

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Civil

Análisis del desplazamiento lateral en pilotes de gran diámetro. Utilización de modelos analíticos, normativas y modelos numéricos.

Autor: Javier Méndez Lara

Tutor: Percy Durand Neyra

**Dpto. de Estructuras de Edificación e Ingeniería
del Terreno**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Civil

Análisis del desplazamiento lateral en pilotes de gran diámetro. Utilización de modelos analíticos, normativas y modelos numéricos.

Autor:

Javier Méndez Lara

Tutor:

Percy Durand Neyra

Profesor titular

Dpto. de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Grado: Análisis del desplazamiento lateral en pilotes de gran diámetro. Utilización de modelos analíticos, normativas y modelos numéricos.

Autor: Javier Méndez Lara

Tutor: Percy Durand Neyra

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo Fin de Grado arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

A mi familia y Ángela

A mis compañeros de viaje

Agradecimientos

En primer lugar, he de agradecer a mis compañeros de devoción, quienes me han instruido en aspectos de la vida que no se imparten en ninguna escuela. Especialmente a Manu Cumbreiras y Fernando Gómez a los que considero como un hermano mayor y un padre respectivamente.

En siguiente lugar, a mis profesores, por enseñarme la belleza que puede haber en una armadura, un dique o un terraplén; tarea nada fácil.

A mis compañeros de viaje: Fran, Agustín, Juanma y Carlos. Sin ninguno de ellos no hubiera llegado hoy al final de este camino. Gracias por toda la ayuda prestada y por las risas diarias que hacían más amenos los tramos tortuosos del camino.

Por último, y no menos importante, a mi familia. A mi hermano Eusebio por darme ánimos aun cuando su viaje ha sido mucho más difícil. A Ángela, piedra que me ha sostenido durante estos cinco años sin descanso y la única que sabe realmente todo lo que me ha costado esta andadura. A mi hermana Carmen, espejo en el que me miro cada mañana que me levanto. A mis padres, Javier y María del Carmen, por darme la maravillosa oportunidad de formarme como profesional y como persona. A vosotros dos os dedico todos los éxitos de mi vida.

Javier Méndez Lara

Sevilla, 2018

A lo largo de los años, diversos métodos se han propuesto para analizar la interacción suelo-estructura y resolver el problema de un pilote cargado lateralmente; desde métodos analíticos que consideran el suelo como un elemento puramente elástico, hasta otros más avanzados, que utilizan modelos numéricos que tienen en cuenta la influencia de las deformaciones plásticas en el comportamiento del terreno.

Actualmente, en España, existe una normativa de obligado cumplimiento para las obras de edificación y dos guías con recomendaciones constructivas para obras de carreteras y para obras marítimas. En estos tres documentos se propone un método semianalítico de fácil aplicación que puede usarse en primera instancia bajo unas condiciones iniciales de terreno.

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es analizar las diferencias existentes entre los diferentes métodos de cálculo de los desplazamientos laterales. A continuación, se verificará si estos métodos, incluidos los propuestos por la normativa, guías y documentos técnicos, se encuentran dentro de los rangos de seguridad establecidos. Para ello, se utilizarán modelos numéricos más completos que tienen en cuenta el problema de interacción terreno-pilote y modelos de comportamiento del terreno avanzados.

En primer lugar, se estudiarán de forma separada, y sin establecer un estudio comparativo, los diferentes métodos de cálculo en el apartado “Estado del conocimiento”. A continuación, se analizará cómo influyen los diferentes parámetros que definen el problema en los desplazamientos y esfuerzos. Por último, se hará el estudio comparativo entre los diferentes métodos propuestos para el caso de una arena y una arcilla con el fin de extraer las conclusiones finales y verificar la idoneidad de los métodos de cálculo de desplazamientos laterales propuestos en las normativas españolas.

Over the years, different methods have been proposed to analyse the interaction between soil and structure, and to solve the problem of a laterally loaded pile; from analytical methods which consider soil as a purely elastic element, to the most advanced methods, which use numerical methods and consider the influence of plastic strain on the behaviour of the terrain.

Nowadays, there is a binding regulation in Spain concerning building works, and two guides that include recommendations for road and maritime works. In these three documents a simple semi-analytical method is proposed to be used in first place under certain initial terrain conditions.

The purpose of this Final Degree Project is the analysis of the differences among some current methods of calculation of lateral displacements in order to determine if they, including those methods proposed by the Spanish regulations, are within the margin of safety. To this end, more complete numerical methods are used because they both consider the interaction terrain-pile and use advanced models of behaviour of the terrain.

Firstly, in this project, the different methods of calculation will be analysed separately without establishing a comparative study. Secondly, we will analyse the influence of the different parameters that define the problem on the displacements and forces. Finally, a comparative study among the different methods will be conducted for the case of sand and clay to draw the final conclusions and to verify if the semi-analytical method is safe enough.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xix
Índice de Figuras	xxi
Notación	xxv
1 Introducción	1
1.1 <i>Introducción general</i>	1
1.2 <i>Definición del problema</i>	1
1.3 <i>Objetivos</i>	2
1.4 <i>Limitaciones</i>	2
1.5 <i>Contenido del trabajo</i>	3
2 Estado del Conocimiento	4
2.1 <i>Método de Broms</i>	4
2.1.1 Método del Módulo de Balasto	4
2.1.2 Método de Broms para arcillas	4
2.1.3 Método de Broms para arenas	6
2.2 <i>Método elástico de Poulos</i>	11
2.3 <i>Método simplificado CTE, GCOC, ROM-05</i>	12
2.3.1 Introducción	12
2.3.2 Método simplificado	12
2.4 <i>Método p-y</i>	16
2.4.1 Introducción	16
2.4.2 Curva p-y de Matlock (1970).	18
2.4.3 Curva p-y de Reese et al. (1974) para arenas.	19
2.5 <i>El Método de los Elementos Finitos</i>	20
2.5.1 El MEF	20
2.5.2 El elemento <i>pilote embebido</i> de PLAXIS	22
2.5.3 El elemento placa de PLAXIS (Axilsimétrico)	24
3 Caracterización del terreno y pilote	25
3.1 <i>Caracterización del terreno</i>	25
3.1.1 Modelo constitutivo	25
3.1.2 Arcillas	26
3.1.3 Arenas	27
3.1.4 Otras características del terreno.	30
3.2 <i>Caracterización del pilote</i>	30
3.2.1 Propiedades generales	30
3.2.2 Características del pilote de acero	31
3.2.3 Características del pilote de hormigón armado HA-45	31
3.2.4 Método de las presiones efectivas	31

3.2.5	Método de las presiones totales	32
4	Método normativo y analítico (Broms). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.	33
4.1	<i>Introducción</i>	33
4.2	<i>Pilote enterrado en terreno homogéneo arcilloso</i>	33
4.2.1	Influencia de la longitud del pilote para los métodos de cálculo de Broms y ROM-05	33
4.2.2	Influencia del diámetro del pilote para los métodos de cálculo de Broms y ROM-05	42
4.2.3	Influencia de la consistencia del terreno para los métodos de cálculo de Broms y ROM-05	50
4.2.4	Influencia del tipo de material del pilote para los métodos de cálculo de Broms y ROM-05	58
4.3	<i>Pilote enterrado en terreno homogéneo arenoso</i>	64
4.3.1	Influencia de la longitud del pilote para los métodos de cálculo de Broms y Normativas	64
4.3.2	Influencia del diámetro del pilote para los métodos de cálculo de Broms y Normativas	72
4.3.3	Influencia de la compacidad del terreno para los métodos de cálculo de Broms y Normativas	80
4.3.4	Influencia según material del pilote para los métodos de cálculo de Broms y Normativas	88
4.3.5	Influencia de la existencia del NF para los métodos de cálculo de Broms y Normativas	94
5	Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.	100
5.1	<i>Introducción</i>	100
5.2	<i>Pilote enterrado en terreno homogéneo arcilloso</i>	100
5.2.1	Influencia de la longitud del pilote para los métodos de cálculo de RSPILE Y PLAXIS 2D (Elemento <i>placa</i>).	100
5.2.2	Influencia del diámetro del pilote para los métodos de cálculo de RSPILE Y PLAXIS 2D (Elemento <i>placa</i>).	108
5.2.3	Influencia de la consistencia del terreno para los métodos de cálculo de RSPILE Y PLAXIS 2D (Elemento <i>placa</i>).	114
5.2.4	Influencia del tipo de material del pilote para los métodos de cálculo de RSPILE Y PLAXIS 2D (Elemento <i>placa</i>).	122
5.3	<i>Pilote enterrado en terreno homogéneo arenoso</i>	128
5.3.1	Influencia de la longitud del pilote para los métodos de cálculo de RSPILE Y PLAXIS 2D (Elemento <i>placa</i>).	128
5.3.2	Influencia del diámetro del pilote para los métodos de cálculo de RSPILE Y PLAXIS 2D (Elemento <i>placa</i>).	136
5.3.3	Influencia de la compacidad del terreno para los métodos de cálculo de RSPILE Y PLAXIS 2D (Elemento <i>placa</i>).	142
5.3.4	Influencia del tipo de material del pilote para los métodos de cálculo de RSPILE Y PLAXIS 2D (Elemento <i>placa</i>).	150
5.3.5	Influencia de la existencia del NF para los métodos de cálculo de RSPILE Y PLAXIS 2D (Elemento <i>placa</i>).	156
6	Análisis comparativo de todos los métodos para un caso específico	162
6.1	<i>Introducción</i>	162
6.2	<i>Pilote enterrado en un terreno homogéneo arcilloso</i>	162
6.2.1	Características del terreno y del pilote para el método de Broms	162
6.2.2	Características del terreno y del pilote para el modelo de la ROM-05	163
6.2.3	Características del terreno y del pilote para modelo del RSPILE	163
6.2.4	Características del terreno y del pilote para modelo del PLAXIS 2D (Axilimétrico)	164
6.2.5	Características del terreno y del pilote para PLAXIS 2D (Deformación plana)	165
6.2.6	Resultados	165
6.3	<i>Pilote enterrado en un terreno homogéneo arenoso</i>	173
6.3.1	Características del terreno y del pilote para el método de Broms	173
6.3.2	Características del terreno y del pilote para el modelo normativo	173
6.3.3	Características del terreno y del pilote para modelo del RSPILE	174
6.3.4	Características del terreno y del pilote para modelo del PLAXIS 2D (Axilimétrico)	174
6.3.5	Características del terreno y del pilote para PLAXIS 2D (Deformación plana)	175

6.3.6	Resultados	175
7	Resumen y conclusiones	183
7.1	<i>Introducción</i>	183
7.2	<i>Conclusiones del capítulo 4.</i>	183
7.3	<i>Conclusiones del capítulo 5.</i>	184
7.4	<i>Conclusiones del capítulo 6.</i>	185
7.5	<i>Conclusiones generales</i>	186
8	Líneas de investigación futuras	187
	Referencias bibliográficas	188

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Criterios de signos positivos (Broms)	5
Tabla 2.2 Coeficientes A y n_H según Terzaghi	7
Tabla 2.3. Curvas p - y y autores.	17
Tabla 2.4. Valores representativos de ε_{50} para arcillas normalmente consolidadas.	18
Tabla 2.5. Valores representativos de k_{py}	19
Tabla 3.1. Valores de C_u utilizados	26
Tabla 3.2. Valores del peso específico (arcillas)	26
Tabla 3.3. Valores del coeficiente de Poisson (arcillas)	27
Tabla 3.4. Valores del módulo E (arcillas).	27
Tabla 3.5. Valores del peso específico (arenas)	28
Tabla 3.6. Valores del coeficiente de Poisson y del ángulo de dilatación (arenas).	29
Tabla 3.7. Valores utilizados de A y n_H (arenas)	30
Tabla 3.8. Características del pilote de acero	31
Tabla 3.9. Características del pilote de hormigón armado	31
Tabla 4.1. Parámetros del terreno y del módulo k_H (Broms) a partir de la ecuación (2.7).	33
Tabla 4.2. Valores del módulo k_H (Broms) según diámetro del pilote a partir de la ecuación (2.7).	42
Tabla 4.3. Parámetros del terreno y valores del módulo k_H (Broms) según consistencia del terreno a partir de la ecuación (2.7).	50
Tabla 4.4. Parámetros terreno granular para arena media a partir de la ecuación (2.13).	64
Tabla 4.5. Parámetros terreno granular según compacidad del terreno a partir de la ecuación (2.13).	80
Tabla 5.1. Parámetros del terreno (arcilla media) para RSPILE	100
Tabla 5.2. Parámetros del terreno (arcilla media) para PLAXIS 2D	101
Tabla 5.3. Parámetros del pilote para RSPILE según longitud del pilote.	101
Tabla 5.4. Parámetros del pilote para elemento <i>placa</i> (PLAXIS 2D) según longitud del pilote.	101
Tabla 5.5. Parámetros del pilote para RSPILE según diámetro del pilote.	108
Tabla 5.6. Parámetros del pilote para elemento <i>placa</i> (PLAXIS 2D) según diámetro de éste.	108
Tabla 5.7. Parámetros del terreno para RSPILE según consistencia del terreno.	114
Tabla 5.8. Parámetros del terreno para PLAXIS 2D según consistencia del terreno.	114
Tabla 5.9. Parámetros del pilote para RSPILE según consistencia del terreno.	115
Tabla 5.10. Parámetros del pilote para elemento <i>placa</i> (PLAXIS 2D) según consistencia del terreno	115
Tabla 5.11. Parámetros del pilote para RSPILE según material: HA-45 o Acero	122
Tabla 5.12. Parámetros del pilote para elemento <i>placa</i> (PLAXIS 2D) según material: HA-45 o acero.	122
Tabla 5.13. Parámetros del terreno (arena media) para RSPILE	128
Tabla 5.14. Parámetros del terreno (arena media) para PLAXIS 2D	128
Tabla 5.15. Parámetros del pilote para RSPILE según longitud del pilote.	129

Tabla 5.16. Parámetros del pilote para elemento <i>placa</i> (PLAXIS 2D) según longitud del pilote.	129
Tabla 5.17. Parámetros del pilote para RSPILE según diámetro del pilote.	136
Tabla 5.18. Parámetros del pilote para elemento <i>placa</i> (PLAXIS 2D) según diámetro	136
Tabla 5.19. Parámetros del terreno para RSPILE según compacidad del terreno.	142
Tabla 5.20. Parámetros del terreno para PLAXIS 2D según compacidad del terreno.	142
Tabla 5.21. Parámetros del pilote para RSPILE según compacidad del terreno.	143
Tabla 5.22. Parámetros del pilote para elemento <i>placa</i> (PLAXIS 2D) según compacidad del terreno	143
Tabla 5.23. Parámetros del pilote para RSPILE según material: HA-45 o Acero	150
Tabla 5.24. Parámetros del pilote para elemento <i>placa</i> (PLAXIS 2D) según material: HA-45 o acero.	150
Tabla 5.25. Parámetros del terreno (arena media) para RSPILE según presencia del nivel freático	156
Tabla 5.26. Parámetros del pilote para elemento <i>placa</i> (PLAXIS 2D) según presencia del nivel freático.	156
Tabla 6.1. Parámetros del terreno y del módulo k_H (Broms) a partir de la ecuación (2.7).	162
Tabla 6.2. Parámetros del terreno (ROM-05).	163
Tabla 6.3. Parámetros del terreno (arcilla media) para RSPILE.	163
Tabla 6.4. Parámetros del pilote para RSPILE en arcilla media.	163
Tabla 6.5. Parámetros del terreno (arcilla media) para PLAXIS 2D.	164
Tabla 6.6. Parámetros del pilote para elemento <i>placa</i> (PLAXIS 2D) en una arcilla media.	164
Tabla 6.7. Parámetros del pilote para elemento pilote embebido (PLAXIS 2D) en arcilla media.	165
Tabla 6.8. Parámetros terreno granular para arena media a partir de la ecuación (2.13).	173
Tabla 6.9. Parámetros del terreno (arena media) para RSPILE	174
Tabla 6.10. Parámetros del pilote para RSPILE en arena media.	174
Tabla 6.11. Parámetros del terreno (arena media) para PLAXIS 2D.	174
Tabla 6.12. Parámetros del pilote para elemento <i>placa</i> (PLAXIS 2D) en una arena media.	175
Tabla 6.13. Parámetros del pilote para elemento pilote embebido (PLAXIS 2D) en arena media.	175

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Coeficientes K_{ij} .	6
Figura 2.2 recuperada del CTE (figura D.1) que relaciona el ángulo ϕ con N_{SPT} .	7
Figura 2.3 Gráficas de Matlock y Reese (1956) para determinar desplazamiento, momento y cortante.	9
Figura 2.4. Gráficas de Matlock y Reese (1956) para determinar giros.	10
Figura 2.5. Placa deformada según teoría Mindlin-Reissner.	11
Figura 2.6. Pilote equivalente (Figura F.8 recuperada del CTE).	12
Figura 2.7. Valores de n_H propuestos por las normativas.	13
Figura 2.8. Cálculo de esfuerzos según normativas.	15
Figura 2.9. Representación de la variación de k_H con la profundidad.	16
Figura 2.10. Representación gráfica del concepto p - y .	17
Figura 2.11. Discretización del pilote en n segmentos	17
Figura 2.12. Curva de Matlock (1970) para arcillas blandas.	18
Figura.2.13. Curva de Reese et al. (1974) para arenas.	19
Figura 2.14. Factores de ajuste A_s y B_s en función de la profundidad.	20
Figura 2.15. Interacción suelo-estructura.	23
Figura 3.1. Diferencia entre superficie de fluencia y potencial plástico	25
Figura 3.2. Círculo de Mohr en tensiones	25
Figura 3.3. Tabla 2.4.3 recuperada de la ROM-05 (arcilla)	27
Figura 3.4. Tabla 2.4.3 recuperada de la ROM-05 (arena)	28
Figuras 4.1. Características del pilote para $L= 15\text{m} - 20\text{m} - 25\text{m} - 30\text{m}$ (Broms)	34
Figuras 4.2. Características del pilote para $L= 15\text{m} - 20\text{m} - 25\text{m} - 30\text{m}$ (ROM-05)	35
Figura 4.3. Evolución desplazamiento lateral al cambiar longitud del pilote (Broms y ROM-05)	37
Figura 4.4. Evolución giro al cambiar longitud del pilote (Broms y ROM-05)	38
Figura 4.5. Evolución momento flector al cambiar longitud del pilote (Broms y ROM-05)	39
Figura 4.6. Evolución esfuerzo cortante al cambiar longitud del pilote (Broms y ROM-05 con criterio del CTE)	40
Figuras 4.7. Características del pilote para $d = 0.85\text{m} - 1.00\text{m} - 1.25\text{m} - 1.50\text{m}$ (Broms)	43
Figuras 4.8. Características del pilote para $d = 0.85\text{m} - 1.00\text{m} - 1.25\text{m} - 1.50\text{m}$ (ROM-05)	44
Figura 4.9. Evolución desplazamiento lateral al cambiar diámetro del pilote (Broms y ROM-05)	45
Figura 4.10. Evolución giro al cambiar diámetro del pilote (Broms y ROM-05)	46
Figura 4.11. Evolución momento flector al cambiar diámetro del pilote (Broms y ROM-05)	47
Figura 4.12. Evolución esfuerzo cortante al cambiar diámetro del pilote (Broms y ROM-05 con criterio del CTE)	48
Figuras 4.13. Características del pilote para $C_u = 40\text{ kPa} - 80\text{ kPa} - 100\text{ kPa}$ (Broms)	51
Figuras 4.14. Características del pilote para $C_u = 40\text{ kPa} - 80\text{ kPa} - 100\text{ kPa}$ (ROM-05)	52

Figura 4.15. Evolución desplazamiento lateral al cambiar consistencia del terreno (Broms y ROM-05)	53
Figura 4.16. Evolución giro al cambiar consistencia del terreno (Broms y ROM-05)	54
Figura 4.17. Evolución momento flector al cambiar consistencia del terreno (Broms y ROM-05)	55
Figura 4.18. Evolución esfuerzo cortante al cambiar consistencia del terreno (Broms y ROM-05 con criterio del CTE)	56
Figuras 4.19. Características del pilote según material: HA-45 o acero (Broms)	58
Figuras 4.20. Características del pilote según material: HA-45 o acero (ROM-05)	58
Figura 4.21. Evolución desplazamiento lateral al cambiar material del pilote (Broms y ROM-05)	59
Figura 4.22. Evolución giro al cambiar material del pilote (Broms y ROM-05)	60
Figura 4.23. Evolución momento flector al cambiar material del pilote (Broms y ROM-05)	61
Figura 4.24. Evolución esfuerzo cortante al cambiar material del pilote (Broms y ROM-05 con criterio del CTE)	62
Figuras 4.25. Características del pilote para $L= 15\text{m} - 20\text{m} - 25\text{m} - 30\text{m}$ (Broms)	65
Figuras 4.26. Características del pilote para $L = 15\text{m} - 20\text{m} - 25\text{m} - 30\text{m}$ (Normativas)	66
Figura 4.27. Evolución desplazamiento lateral al cambiar longitud del pilote (Broms y Normativas)	67
Figura 4.28. Evolución giro al cambiar longitud del pilote (Broms y Normativas)	68
Figura 4.29. Evolución momento flector al cambiar longitud del pilote (Broms y Normativas)	69
Figura 4.30. Evolución esfuerzo cortante al cambiar longitud del pilote (Broms y Normativas con criterio del CTE)	70
Figuras 4.31. Características del pilote para $d = 0.85\text{m} - 1.00\text{m} - 1.25\text{m} - 1.50\text{m}$ (Broms)	73
Figuras 4.32. Características del pilote para $d = 0.85\text{m} - 1.00\text{m} - 1.25\text{m} - 1.50\text{m}$ (Normativas)	74
Figura 4.33. Evolución desplazamiento lateral al cambiar diámetro del pilote (Broms y Normativas)	75
Figura 4.34. Evolución giro al cambiar diámetro del pilote (Broms y Normativas)	76
Figura 4.35. Evolución momento flector al cambiar diámetro del pilote (Broms y Normativas)	77
Figura 4.36. Evolución esfuerzo cortante al cambiar diámetro del pilote (Broms y Normativas con criterio del CTE)	78
Figuras 4.37. Características del pilote para arena floja, media y densa (Broms)	81
Figuras 4.38. Características del pilote para arena floja, media y densa (Normativas)	82
Figura 4.39. Evolución desplazamiento lateral al cambiar compacidad del terreno (Broms y Normativas)	83
Figura 4.40. Evolución giro al cambiar compacidad del terreno (Broms y Normativas)	84
Figura 4.41. Evolución momento flector al cambiar compacidad del terreno (Broms y Normativas)	85
Figura 4.42. Evolución esfuerzo cortante al cambiar compacidad del terreno (Broms y Normativas con criterio del CTE)	86
Figuras 4.43. Características del pilote según material: HA-45 o acero (Broms)	88
Figuras 4.44. Características del pilote según material: HA-45 o acero (Normativas)	88
Figura 4.45. Evolución desplazamiento lateral al cambiar material del pilote (Broms y Normativas)	89
Figura 4.46. Evolución giro al cambiar material del pilote (Broms y Normativas)	90
Figura 4.47. Evolución momento flector al cambiar material del pilote (Broms y Normativas)	91
Figura 4.48. Evolución esfuerzo cortante al cambiar material del pilote (Broms y Normativas con criterio del CTE)	92
Figuras 4.49. Características del terreno según existencia del NF	94

Figuras 4.50. Características del pilote según existencia del NF (Broms y normativas)	94
Figura 4.51. Evolución desplazamiento lateral según existencia del NF (Broms y Normativas)	95
Figura 4.52. Evolución giro según existencia del NF (Broms y Normativas)	96
Figura 4.53. Evolución momento flector según existencia del NF (Broms y Normativas)	97
Figura 4.54. Evolución esfuerzo cortante según existencia del NF (Broms y Normativas con criterio del CTE)	98
Figura 5.1. Evolución desplazamiento lateral al cambiar longitud del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	103
Figura 5.2. Evolución giro al cambiar longitud del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	104
Figura 5.3. Evolución momento flector al cambiar longitud del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	105
Figura 5.4. Evolución esfuerzo cortante al cambiar longitud del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	106
Figura 5.5. Evolución desplazamiento lateral al cambiar diámetro del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	109
Figura 5.6. Evolución giro al cambiar diámetro del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	110
Figura 5.7. Evolución momento flector al cambiar diámetro del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	111
Figura 5.8. Evolución esfuerzo cortante al cambiar diámetro del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	112
Figura 5.9. Evolución desplazamiento lateral al cambiar consistencia del terreno (RSPILE Y PLAXIS 2D)	117
Figura 5.10. Evolución giro al cambiar consistencia del terreno (RSPILE Y PLAXIS 2D)	118
Figura 5.11. Evolución momento flector al cambiar consistencia del terreno (RSPILE Y PLAXIS 2D)	119
Figura 5.12. Evolución esfuerzo cortante al cambiar consistencia del terreno (RSPILE Y PLAXIS 2D)	120
Figura 5.13. Evolución desplazamiento lateral al cambiar material del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	123
Figura 5.14. Evolución giro al cambiar material del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	124
Figura 5.15. Evolución momento flector al cambiar material del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	125
Figura 5.16. Evolución esfuerzo cortante al cambiar material del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	126
Figura 5.17. Evolución desplazamiento lateral al cambiar longitud del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	131
Figura 5.18. Evolución giro al cambiar longitud del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	132
Figura 5.19. Evolución momento flector al cambiar longitud del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	133
Figura 5.20. Evolución esfuerzo cortante al cambiar longitud del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	134
Figura 5.21. Evolución desplazamiento lateral al cambiar diámetro del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	137
Figura 5.22. Evolución giro al cambiar diámetro del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	138
Figura 5.23. Evolución momento flector al cambiar diámetro del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	139
Figura 5.24. Evolución esfuerzo cortante al cambiar diámetro del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	140
Figura 5.25. Evolución desplazamiento lateral al cambiar compacidad del terreno (RSPILE Y PLAXIS 2D)	145
Figura 5.26. Evolución giro al cambiar compacidad del terreno (RSPILE Y PLAXIS 2D)	146
Figura 5.27. Evolución momento flector al cambiar compacidad del terreno (RSPILE Y PLAXIS 2D)	147
Figura 5.28. Evolución esfuerzo cortante al cambiar compacidad del terreno (RSPILE Y PLAXIS 2D)	148
Figura 5.29. Evolución desplazamiento lateral al cambiar material del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	151
Figura 5.30. Evolución giro al cambiar material del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	152
Figura 5.31. Evolución momento flector al cambiar material del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	153
Figura 5.32. Evolución esfuerzo cortante al cambiar material del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)	154
Figura 5.33. Evolución desplazamiento lateral según existencia del NF (RSPILE Y PLAXIS 2D)	157
Figura 5.34. Evolución giro según existencia del NF (RSPILE Y PLAXIS 2D)	158

Figura 5.35. Evolución momento flector según existencia del NF (RSPILE Y PLAXIS 2D)	159
Figura 5.36. Evolución esfuerzo cortante según existencia del NF (RSPILE Y PLAXIS 2D)	160
Figura 6.1. Parámetros del pilote enterrado en una arcilla media (Broms).	162
Figura 6.2. Parámetros del pilote enterrado en una arcilla media (ROM-05).	163
Figura 6.3. Desplazamiento lateral según los diferentes métodos estudiados en una arcilla media.	167
Figura 6.4. Giro según los diferentes métodos estudiados en una arcilla media.	168
Figura 6.5. Momento flector según los diferentes métodos estudiados en una arcilla media.	169
Figura 6.6. Esfuerzo cortante según los diferentes métodos estudiados en una arcilla media.	170
Figura 6.7. Parámetros del pilote enterrado en una arena media (Broms).	173
Figura 6.8. Parámetros del pilote enterrado en una arena media (Normativas).	173
Figura 6.9. Desplazamiento lateral según los diferentes métodos estudiados en una arena media.	177
Figura 6.10. Giro según los diferentes métodos estudiados en una arena media.	178
Figura 6.11. Momento flector según los diferentes métodos estudiados en una arena media.	179
Figura 6.12. Esfuerzo cortante según los diferentes métodos estudiados en una arena media.	180

β	Inverso de la longitud elástica (Broms). [m^{-1}]
γ	Peso específico aparente del terreno. [kN/m^3]
γ'	Peso específico efectivo del terreno. [kN/m^3]
γ_p	Peso específico del material del pilote. [kN/m^3]
γ_{SAT}	Peso específico saturado del terreno. [kN/m^3]
δ_i	Campo de desplazamientos virtuales δ_i (MEF)
ε_{ij}	Campo de deformaciones virtuales ε_{ij} (MEF)
σ_{ij}	Campo de tensiones σ_{ij} (MEF)
σ'_{vp}	Presión efectiva al nivel de la punta del pilote [kPa]
τ_f	Resistencia unitaria por fuste [kPa]
ϕ	Ángulo de rozamiento del terreno. [°]
θ	Giro experimentado por el pilote.
ν	Coefficiente de Poisson.
ψ	Ángulo de dilatación [°]
A	Coefficiente A adoptado por Terzaghi (Broms).
A_p	Área del pilote [m^2]
A_s y B_s	Factores de ajuste (RSPILE)
CTE	Código Técnico de Edificación.
cte	Constante.
c	Cohesión [kN/m^2]
C_u	Cohesión/Resistencia al corte sin drenaje de una arcilla. [kPa]
d	Diámetro del pilote. [m]
d_{eq}	Espesor de la placa equivalente (MEF). [m]
E_{50}	Módulo secante del suelo. [kN/m^2]
E_{cm}	Módulo de deformación longitudinal secante del hormigón. [MPa]
E	Módulo de deformación del suelo. [kN/m^2]
E_p	Módulo de elasticidad del pilote. [kN/m^2]
f_{ck}	Resistencia característica del hormigón a los 28 días de edad.
f_{cm}	Resistencia media a compresión del hormigón a los 28 días de edad.
f_D	Coefficiente de corrección por tamaño del pilote.
F_{IJ}	Coefficientes F_{IJ} que determinan desplazamientos y esfuerzos en arenas (Broms)
GCOC	Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras.
G_s	Módulo elástico transversal del suelo. (MEF) [kN/m^2]
H	Carga lateral aplicada. [kN]
HA	Hormigón armado
I_p	Momento de inercia del pilote. [m^4]
ISF_{RN}	Factor de rigidez de la interfaz para R_N (MEF)
ISF_{RS}	Factor de rigidez de la interfaz para R_S (MEF)

ISF_{KF}	Factor de rigidez de la interfaz para K_f (MEF)
J	Factor determinado experimentalmente por Matlock igual a 0.5 (RSPILE)
K_θ	Constante elástica del muelle que impide la rotación (Normativas). [kNm]
K_f	Rigidez en la base del pilote (MEF) [kN/m]
K_H	Constante elástica del muelle que impide la traslación lateral (Normativas). [kN/m]
k_H	Módulo de balasto horizontal del suelo. [kN/m ³]
K_{II}	Coeficientes K_{II} que determinan desplazamientos y esfuerzos en arcillas (Broms).
k_{PY}	Coeficiente k_{PY} [kN/m ³] que define la pendiente inicial de la curva <i>p-y</i>
k_S	Coeficiente de balasto del suelo. [kN/m ³]
L	Longitud del pilote. [m]
L_c	Profundidad crítica [m]
L_{eq}	Longitud del pilote equivalente (Normativas). [m]
l_1	Longitud exenta del pilote (Normativas). [m]
l_2	Longitud pilote enterrado (Normativas). [m]
M_0	Momento aplicado en la cabeza del pilote. [kNm]
MEF	Método de los Elementos Finitos.
N o N_{SPT}	Número de golpes en el ensayo SPT.
NF	Nivel freático.
n_H	Coeficiente de reacción del suelo. [kN/m ³]
N_q	Coeficiente de la carga por hundimiento del pilote
p	Resultante de las reacciones del suelo. [kN/m ²]
p_{ULT}	Presión última del suelo (RSPILE). [kN/m]
q_P	Resistencia unitaria por punta del pilote.
ROM-05	Recomendaciones geotécnicas para Obras Marítimas y portuarias.
$R_{FK/m}$	Resistencia por fuste por metro lineal de pilote (MEF) [kN/m]
R_{PK}	Resistencia por punta (MEF) [kN]
R_N	Rigidez lateral del fuste. (MEF) [kN/m ² /m]
R_S	Rigidez axial del fuste. (MEF) [kN/m ² /m]
T	Longitud elástica del pilote. [m]
u	Campo de desplazamientos de los nodos del dominio (MEF)
w	Peso de la placa (MEF)
y	Desplazamiento lateral experimentado por el pilote. [m]
y_k	Desplazamiento lateral característico experimentado por el pilote (RSPILE). [m]
y_u	Desplazamiento lateral último experimentado por el pilote (RSPILE). [m]
z	Profundidad estudiada. [m]
z_0	Profundidad dependiente de la longitud elástica T (Normativas). [m]

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción general

Aunque el uso de pilotes se destina principalmente para soportar cargas verticales, no es poco frecuente que también deban soportar cargas laterales. Éstas pueden proceder de fuerzas externas como el viento o el oleaje, del atraque embarcaciones en muelles, del deslizamiento de tierras adyacentes como ocurre en pilotes cercanos a terraplenes o en muros de contención o por causa de un sismo.

Modelar el comportamiento de cimentaciones profundas ante cargas laterales es mucho más complejo que en el caso ante cargas verticales. La razón reside en la interacción terreno-estructura donde: el comportamiento del pilote es esencialmente elástico y el del terreno circundante oscila entre elástico y plástico.

Diversos autores proponen métodos para cuantificar la oposición que ejerce el terreno a lo largo de todo el pilote ante el desplazamiento de éste. Se comentan a continuación algunos de ellos:

- Winkler (1867), Terzaghi (1955) y Broms (1964), en base a la teoría del módulo de balasto, representan el suelo por resortes de rigidez k_s . Para ello, asumieron simplificaciones tales como la modelización del pilote como una placa delgada o que el módulo de balasto horizontal variaba con la profundidad o era constante con ésta.
- Poulos (1971) consideró el suelo como un semiespacio elástico, homogéneo e isótropo donde las presiones del terreno eran constantes alrededor del ancho del pilote. Utiliza la teoría de Mindlin-Reissner para modelizar el comportamiento del terreno (elástico lineal).
- McClelland y Focht (1958) introdujeron el concepto de las curvas $p-y$ que permiten relacionar la resultante de los empujes del suelo circundante (p) con la flexión que sufre el pilote (y). Estas curvas permiten obtener valores del módulo de deformación del suelo. Generalmente, estas curvas son no lineales y varían arbitrariamente con la profundidad.
- El método simplificado o semianalítico propuesto por el Código Técnico de Edificación (CTE), por la Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras (GCOC) y por la guía de Recomendaciones geotécnicas para Obras Marítimas y portuarias (ROM-05) sustituye el pilote por una varilla indeformable de longitud equivalente y el terreno por tres resortes que representan la deformabilidad de éste.
- El *software* PLAXIS basa sus cálculos en el método numérico de los elementos finitos (MEF). El MEF consiste en descomponer el terreno en un número discreto de elementos triangulares conectados entre sí por nodos. Conocidos los movimientos de los nodos, se pueden conocer los movimientos de todos los puntos de la malla y, a partir de éstos, las deformaciones y tensiones que sufren. De igual manera, conociendo la tensión en los nodos, podemos conocer el desplazamiento de todos los puntos.

En el Estado del Conocimiento, todos los modelos mencionados se aplican de forma separada y no se establece un estudio comparativo. En este TFG, el comportamiento lateral de un pilote aislado sometido a cargas horizontales y momentos, así como a ciertas condiciones relacionadas con la geometría y características resistentes de los materiales, es analizado con diversos métodos obteniéndose resultados que permitan concluir si algunos de los modelos basados en normativas se ajustan mejor a los cálculos. Para ello, se recurrirá a métodos más completos y avanzados.

1.2 Definición del problema

Sobre la base de los métodos de equilibrio y numéricos, en este TFG se pretende analizar el comportamiento de un pilote aislado sometido a una carga horizontal de 400 kN y un momento flector de 200 kNm y comparar los resultados obtenidos de desplazamiento horizontal, giro, momento flector y esfuerzo cortante a lo largo del fuste del elemento esbelto.

El pilote estará enterrado en dos tipos de estratos homogéneos: uno arcilloso (C_u) o en otro arenoso (ϕ).

Además del tipo de terreno, el problema estará definido por las siguientes condiciones:

- Longitud del pilote: 15m, 20m, 25m, 30m.
- Diámetro del pilote: 0.85m, 1.00m, 1.25m, 1.50m.
- Consistencia/Compacidad del terreno: Arcilla blanda, arcilla media, arcilla firme o arena floja, arena media, arena densa.
- Material del pilote: acero u hormigón armado HA-45.
- Presencia del nivel freático (NF): sólo en el caso de las arenas.
- Métodos de cálculo: Broms, método simplificado de la GCOC, CTE y ROM-05, curvas *p-y* (RSPILE) y MEF (versión PLAXIS 2D 2018 utilizando el elemento *pilote embebido* en deformación plana y el elemento *placa* en axisimétrico).

1.3 Objetivos

Los objetivos del Trabajo Fin de Grado son:

1. Describir y explicar algunos de los métodos existentes que permiten estudiar el comportamiento de un pilote aislado bajo cargas laterales (Estado del Conocimiento).
2. Analizar la evolución de los resultados arrojados por los distintos métodos al cambiar alguno de los parámetros planteados en el apartado 1.2.
3. Analizar dichos métodos para distintas combinaciones pilote-terreno con el fin de detectar importantes diferencias entre ellos en los resultados.
4. Verificar la idoneidad del método semianalítico normativo comparando sus resultados con los obtenidos mediante métodos numéricos, con el objeto de comprobar su utilización en labores de predimensionamiento o en aquellas situaciones en las que el desplazamiento horizontal no resulte ser crítico o condicionante.

1.4 Limitaciones

A la hora de realizar este Trabajo Fin de Grado nos hemos encontrado con las siguientes limitaciones que han condicionado su desarrollo:

- Para calcular los resultados de desplazamiento lateral, giro, momento flector y esfuerzo cortante mediante el método propuesto por Broms en arenas es necesario determinar dos coeficientes por cada esfuerzo y desplazamiento. Estos coeficientes corresponden a los efectos provocados por la carga horizontal y por el momento aplicados en la cabeza del pilote. La limitación surge porque estos coeficientes se han determinado por diferencias finitas para determinadas relaciones L/T y hasta una profundidad adimensional $z/T = 4.5$. Esto provoca que, para algunos casos estudiados, el límite de $z/T = 4.5$ sea insuficiente haciendo tender a cero los esfuerzos a pocos metros de profundidad. Además, deben estimarse algunos valores para relaciones L/T no representadas.
- Tanto el método semianalítico propuesto por las normativas españolas como el propuesto por Broms no consideran la existencia de suelos heterogéneos. Además, el normativo, tampoco considera la opción de que la cabeza del pilote sea empotrada o articulada. Es por esta razón que todos los casos son con la cabeza del pilote libre, terrenos homogéneos y la existencia del NF se considera en superficie (cota $z=0m$).
- El método normativo español utiliza dos gráficas para calcular los esfuerzos: una correspondiente a la contribución de la carga horizontal y otra para la contribución del momento aplicado. Estas gráficas se encuentran en condiciones adimensionales en el eje vertical por una profundidad z_0 , que depende de la longitud elástica T del pilote, hasta un valor máximo de $z/z_0 = 3$. La limitación es parecida a la del

método de Broms, resultando una profundidad insuficiente para algunos casos y la tendencia a cero de los esfuerzos a pocos metros de profundidad.

- El elemento *pilote embebido* del *software* PLAXIS es considerado como un elemento lineal. Esto provoca que no pueda aplicarse una carga ni un desplazamiento previo lineal ya que la malla no podrá ser generada por problemas de superposición de líneas. En resumen, es imposible desplazar el elemento *pilote embebido* aplicando otro elemento lineal a lo largo del propio pilote. Esta limitación provoca que las cargas aplicadas sean puntuales, tanto la carga horizontal de 400 kN como el momento flector de 200 kNm.
- Según Dao (2011), el elemento *pilote embebido* modela mejor pilotes perforados que pilotes hincados; por tanto, se supondrá que el pilote es de este primer tipo.

1.5 Contenido del trabajo

La estructura del trabajo será la siguiente:

- **Capítulo 1:** Breve introducción sobre los distintos métodos resolutivos que se abordarán en el presente trabajo, definición del problema del que nos ocuparemos, determinación de los objetivos que se buscan cumplir con su elaboración, limitaciones a tener en cuenta por los distintos métodos propuestos y contenido del trabajo.
- **Capítulo 2:** Revisión del Estado del Conocimiento actual relacionado con el problema de los pilotes cargados lateralmente. El objetivo de este capítulo es recoger el conocimiento básico requerido para utilizar los distintos métodos propuestos e interpretar correctamente los resultados finales.
 - En primer lugar, nos centraremos en los métodos propuestos por Broms para los casos de arcilla y arena.
 - En segundo lugar, se explicará la formulación de Poulos para su método elástico.
 - En tercer lugar, se recogerá el método simplificado propuesto por las normativas españolas y remarcaremos las posibles diferencias entre ellos.
 - A continuación, se describirá la metodología de las curvas *p-y* destacando aquellas que se utilizarán para terrenos arcillosos y arenosos (*software* RSPILE).
 - En último lugar, se describirá en qué consiste el MEF, los modelos de comportamiento del terreno y las características de los elementos finitos *pilote embebido* y *placa* que se usarán en el *software* PLAXIS 2D.
- **Capítulo 3:** En el tercer capítulo abordaremos la parte de caracterización de los diferentes terrenos estudiados y del pilote. Para ello, se tendrá en cuenta las variables requeridas por cada metodología, la consistencia o compacidad del terreno y la longitud, diámetro y material del pilote usado.
- **Capítulo 4:** Aplicación de la normativa y del método de Broms en el cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente. Se analizará cómo evolucionan en estos métodos los esfuerzos y desplazamientos al cambiar alguno de los parámetros que definen el problema.
- **Capítulo 5:** Aplicación de métodos numéricos (RSPILE y PLAXIS 2D) en el cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente. Se analizará cómo evolucionan en estos métodos los esfuerzos y desplazamientos al cambiar alguno de los parámetros que definen el problema.
- **Capítulo 6:** Análisis comparativo de los resultados de todos los métodos para uno de los casos estudiados dentro del grupo terreno arcilloso y para uno de los estudiados dentro del grupo terreno arenoso.
- **Capítulo 7:** Conclusiones.
- **Capítulo 8:** Líneas de investigación futuras.

2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 Método de Broms

2.1.1 Método del Módulo de Balasto

El método de Broms (1964) se basa en la teoría de Winkler o del Módulo de Balasto (1867). En este modelo, la relación entre la presión y el desplazamiento es:

$$p = k_H \times y \quad (2.1)$$

donde k_H es el módulo de balasto horizontal del terreno y tiene unidades de fuerza/longitud³.

Una de las simplificaciones adoptadas por Broms es la de modelizar el pilote como una placa delgada cuyo movimiento está gobernado por la ecuación de la viga:

$$E_P I_P \frac{d^4 y}{dz^4} = -pd \quad (2.2)$$

Juntando las ecuaciones (2.1) y (2.2), obtendríamos la ecuación que gobierna el movimiento lateral del pilote.

$$E_P I_P \frac{d^4 y}{dz^4} + k_H dy = 0 \quad (2.3)$$

Para resolver esta ecuación, es necesario conocer el valor de k_H . Varias distribuciones han sido propuestas, siendo las más habituales de la forma

$$k_H = k_L \left(\frac{z}{L} \right)^n \quad (2.4)$$

donde k_L es el valor de k_H para $z=L$.

Es en este punto donde debe adoptarse dos valores distintos para el exponente n dependiendo de la tipología del terreno. Se acepta comúnmente que $n=0$ para arcillas ($k_H=\text{cte}$), mientras que, en el caso de las arenas, $n=1$ y por lo tanto k_H varía linealmente. En este caso, se expresa la variación de k_H en función de la profundidad z y del diámetro d .

$$k_H = n_H \times \left(\frac{z}{d} \right) \quad (2.5)$$

siendo n_H el coeficiente de reacción del suelo y tiene unidades de fuerza/longitud³.

2.1.2 Método de Broms para arcillas

Broms (1964) presentó un método para calcular los desplazamientos y esfuerzos que sufre un pilote enterrado en un suelo cohesivo bajo cargas laterales en condiciones no drenadas. Este método, como se ha mencionado anteriormente, se basó en la teoría del módulo de balasto de Winkler (1867). Además, Broms asumió que el suelo se comportaba de manera elástica-lineal.

Al adoptar un valor constante del módulo k_H , la ecuación de la viga presenta solución mediante expresiones analíticas. Broms formuló una expresión para conocer el valor de k_H en función del módulo secante E_{50} .

$$k_H = 1.67 * \frac{E_{50}}{d} \quad (2.6)$$

Sin embargo, el valor constante de k_H que adoptaremos para los cálculos será el propuesto por Davison (1970) por ser más conservador:

$$k_H = \frac{67C_u}{d} \quad (2.7)$$

Se muestran a continuación las expresiones analíticas de cálculo de los desplazamientos, giros, momentos y cortantes:

$$y = \frac{2H\beta}{k_H d} K_{\rho H} - \frac{2M_0\beta^2}{k_H d} K_{\rho M} \quad (2.8)$$

$$\theta = \frac{2H\beta^2}{k_H d} K_{\theta H} + \frac{4M_0\beta^3}{k_H d} K_{\theta M} \quad (2.9)$$

$$M = \frac{H}{\beta} K_{MH} + M_0 K_{MM} \quad (2.10)$$

$$Q = -HK_{QH} + 2M_0\beta K_{QM} \quad (2.11)$$

El valor de β corresponde al inverso de una longitud elástica dependiente de los parámetros del pilote y del módulo k_H

$$\beta = \left(\frac{k_H d}{4E_p I_p} \right)^{1/4} [L^{-1}] \quad (2.12)$$

Se muestra en la tabla 2.1 el criterio de signos positivos adoptados:





Desplazamiento y	
Carga horizontal H	
Giro θ	
Momento aplicado M_0	
Momento flector M	
Esfuerzo cortante Q	

Tabla 2.1 Criterio de signos positivos (Broms).

En la figura 2.1 puede verse las ecuaciones que definen los coeficientes K_{ij}

Coeficientes K_{ij}

$$K_{pH} = \frac{1}{\sinh^2 \beta L - \sin^2 \beta L} * [\sinh \beta L * \cos \beta z * \cosh \beta(L - z) - \sin \beta L * \cosh \beta z * \cos \beta(L - z)]$$

$$K_{\theta H} = \frac{1}{\sinh^2 \beta L - \sin^2 \beta L} * [\sinh \beta L [\sin \beta z * \cosh \beta(L - z) + \cos \beta z * \sinh \beta(L - z)] + \sin \beta L [\sinh \beta z * \cos \beta(L - z) + \cosh \beta z * \sin \beta(L - z)]]$$

$$K_{mH} = \frac{1}{\sinh^2 \beta L - \sin^2 \beta L} * [\sinh \beta L * \sin \beta z * \sinh \beta(L - z) - \sin \beta L * \sinh \beta z * \sin \beta(L - z)]$$

$$K_{qH} = \frac{1}{\sinh^2 \beta L - \sin^2 \beta L} * [\sinh \beta L [\cos \beta z * \sinh \beta(L - z) - \sin \beta z * \cosh \beta(L - z)] - \sin \beta L [\cosh \beta z * \sin \beta(L - z) + \sinh \beta z * \cos \beta(L - z)]]$$

$$K_{pM} = \frac{1}{\sinh^2 \beta L - \sin^2 \beta L} * [\sinh \beta L * [\sin \beta z * \cosh \beta(L - z) - \cos \beta z * \sinh \beta(L - z)] + \sin \beta L * [\sinh \beta z * \cos \beta(L - z) - \cosh \beta z * \sin \beta(L - z)]]$$

$$K_{\theta M} = \frac{1}{\sinh^2 \beta L - \sin^2 \beta L} * [\sinh \beta L * \cos \beta z * \cosh \beta(L - z) + \sin \beta L * \cosh \beta z * \cos \beta(L - z)]$$

$$K_{mM} = \frac{1}{\sinh^2 \beta L - \sin^2 \beta L} * [\sinh \beta L * [\cos \beta z * \sinh \beta(L - z) + \sin \beta z * \cosh \beta(L - z)] - \sin \beta L * [\sinh \beta z * \cos \beta(L - z) + \cosh \beta z * \sin \beta(L - z)]]$$

$$K_{qM} = \frac{1}{\sinh^2 \beta L - \sin^2 \beta L} * [\sinh \beta L * \sin \beta z * \sinh \beta(L - z) + \sin \beta L * \sinh \beta z * \sin \beta(L - z)]$$

Figura 2.1 Coeficientes K_{ij}

2.1.3 Método de Broms para arenas

Broms también presentó un método para calcular los desplazamientos y esfuerzos en un pilote enterrado en un estrato arenoso. Dicho método también se basó en la teoría del módulo de balasto de Winkler (1867) y se consideró igualmente el terreno como elástico-lineal.

La diferencia con el método para terrenos cohesivos radica en que el módulo de balasto horizontal k_H crece linealmente con la profundidad, como se observa en la ecuación (2.5). El hecho de adoptar un módulo de balasto horizontal k_H variable con la profundidad condiciona que la solución se obtenga a partir de métodos aproximados como el de diferencias finitas.

Los valores presentados por Broms para el coeficiente de reacción del suelo n_H son los mismos que presentó Terzaghi (1955) en función del peso específico de la capa de arena y de un coeficiente A dependiente de la densidad relativa o del número de golpes N en el ensayo SPT.

$$n_H = \frac{A\gamma}{1.35} \quad (2.13)$$

Siendo γ el peso específico efectivo del suelo (o sumergido)

Valores de A se indican en la tabla 2.2.

	Densidad relativa		
	Floja	Media	Densa
A (intervalo de valores)	10-300	300-1000	1000-2000
A (valor recomendado)	200	600	1500
n_H en arena seca o húmeda (MN/m ³)	2.5	7.5	20
n_H en arena sumergida (MN/m ³)	1.4	5	12
n_H en arena seca. Otros autores (MN/m ³)	0.5 - 0.9		28 -31
N	4 - 10	11-30	31 - 50

Tabla 2.2 Coeficientes A y n_H según Terzaghi

Si se da el hecho de no disponer de un valor de N , en el CTE por correlación se puede obtener este coeficiente en función del ángulo de rozamiento interno de la arena ϕ (figura D.1).

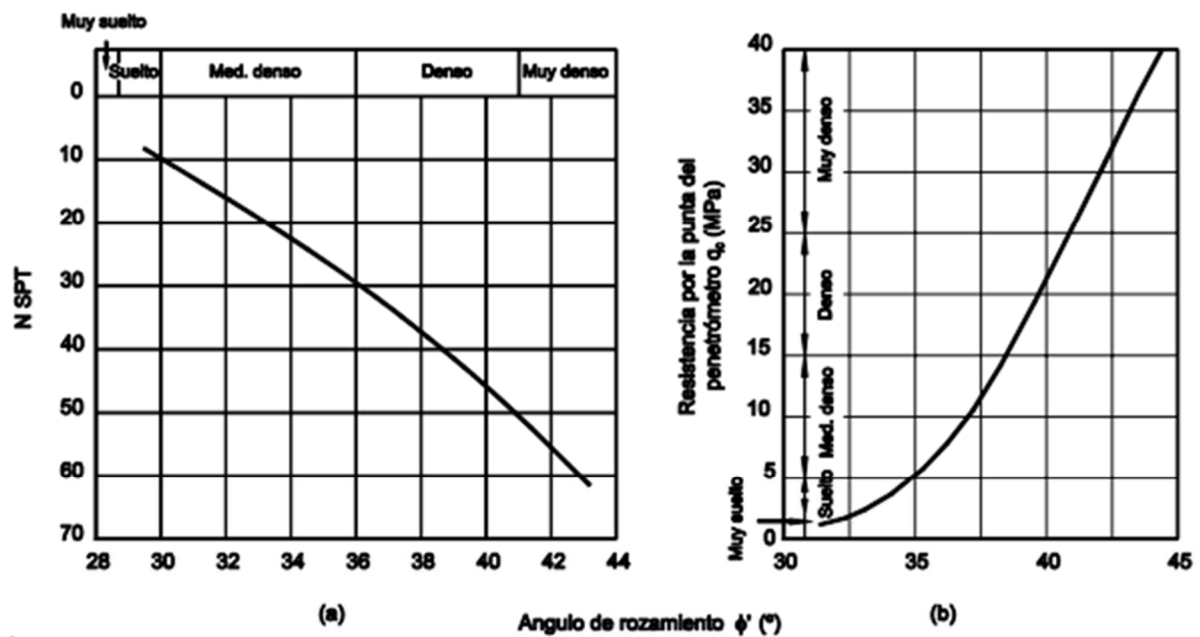


Figura D.1. Correlación entre los ensayos SPT y CPT con el ángulo de rozamiento interno efectivo en suelos granulares

Figura 2.2 recuperada del CTE (figura D.1) que relaciona el ángulo ϕ con N_{SPT}

Matlock y Reese (1956) proponen unas ecuaciones, basadas en el análisis dimensional resultante de resolver la ecuación (2.3), adoptando un valor de k_H para arenas, para calcular el desplazamiento, giro, momento flector y cortante.

$$y = \frac{HT^3}{E_P I_P} F_{\delta 1} + \frac{M_0 T^2}{E_P I_P} F_{\delta 2} \quad (2.14)$$

$$\theta = \frac{HT^2}{E_P I_P} F_{\theta 1} + \frac{M_0 T}{E_P I_P} F_{\theta 2} \quad (2.15)$$

$$M = HT F_{M1} + M_0 F_{M2} \quad (2.16)$$

$$Q = HF_{Q1} + \frac{M_0}{T} F_{Q2} \quad (2.17)$$

T es un factor de rigidez relativa, parecido a una longitud elástica del pilote, dependiente de los parámetros del pilote y del coeficiente de reacción n_H

$$T = \left(\frac{E_P I_P}{n_H} \right)^{1/5} [L] \quad (2.18)$$

Estas ecuaciones tienen en cuenta el principio de superposición, por lo que consideran la contribución tanto de la carga lateral H como del momento aplicado en la cabeza M_0 a través de unos coeficientes F_{ij} que pueden estimarse a partir de ábacos o gráficas (figuras 2.3 y 2.4).

Ha de aclararse que, tanto el cortante como el giro producido a una profundidad z se tomarán con signos contrarios a los expresados en las figuras 2.3 y 2.4. La razón de este cambio se debe porque el sentido positivo, tanto del giro como del cortante recogido, son contrarios a los producidos a la aplicación de cargas consideradas positivas en la tabla 2.1.

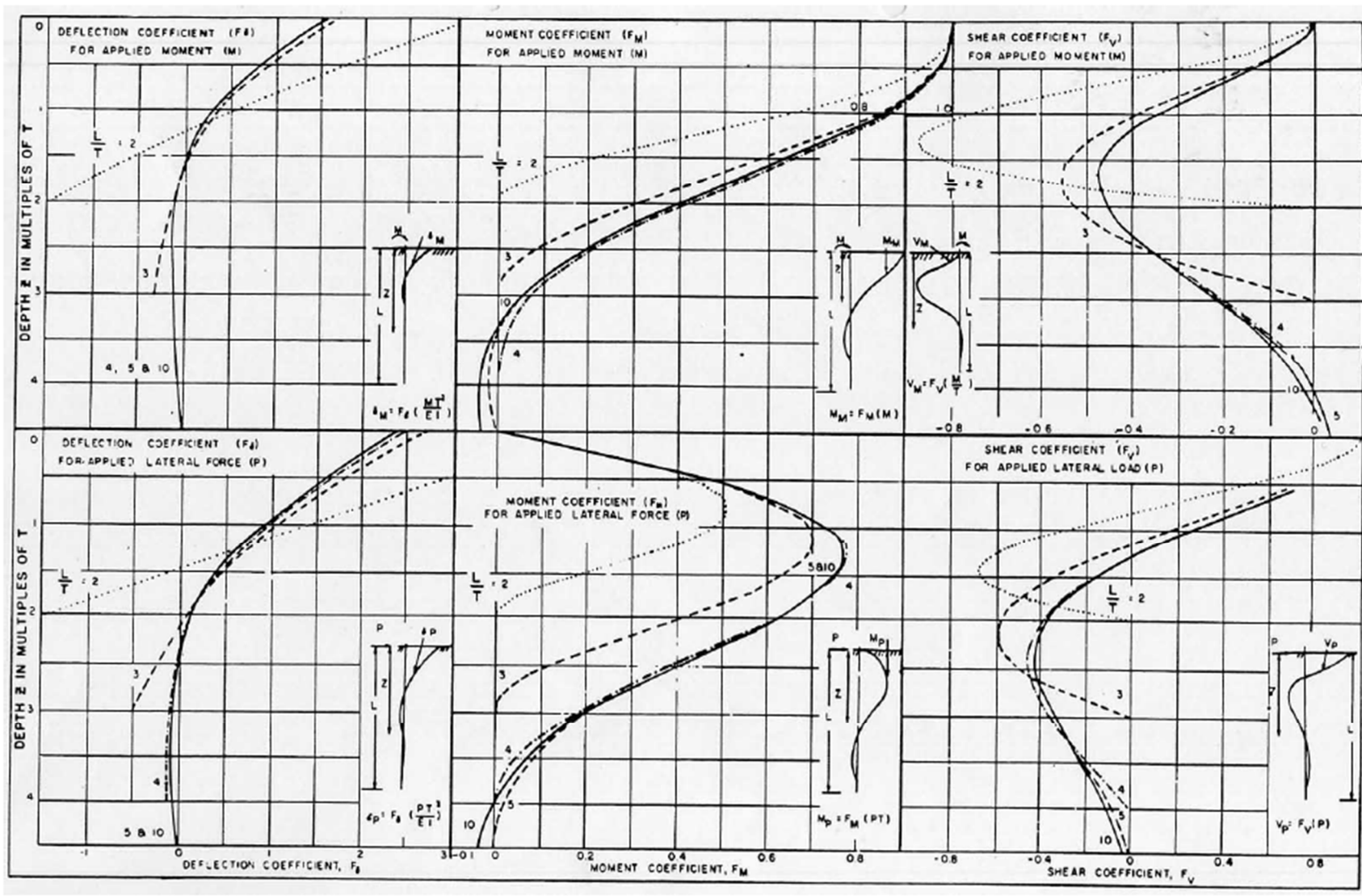


Figura 2.3 Gráficas de Matlock y Reese (1956) para determinar desplazamiento, momento y cortante

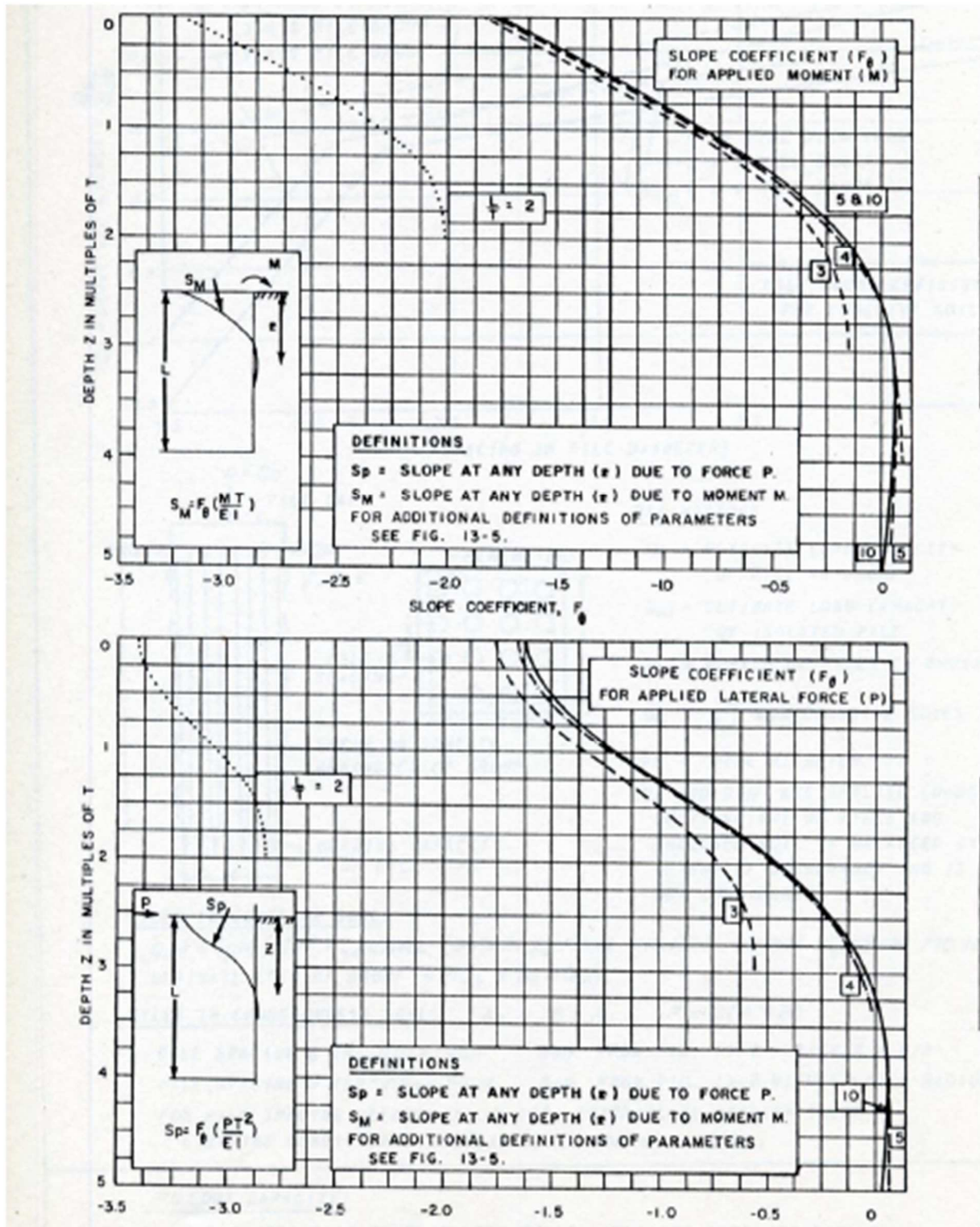


Figura 2.4. Gráficas de Matlock y Reese (1956) para determinar giros

2.2 Método elástico de Poulos

Poulos (1971) planteó una metodología basada en la teoría de la Elasticidad. Para ello, asumió que el suelo era un semiespacio elástico, homogéneo e isótropo donde las presiones del suelo eran constantes alrededor del ancho del pilote. Las propiedades de rigidez del suelo E y ν se mantenían constantes a cualquier profundidad. El pilote se modeló como una barra delgada de sección rectangular.

Para representar el comportamiento del suelo, Poulos utilizó la teoría de placas gruesas de Mindlin-Reissner (1951) en lugar de aceptar la teoría de Winkler, más comúnmente aceptada. La teoría de placas forma parte del estudio de los sólidos deformables y tiene en cuenta la deformación que sufre una sección normal al plano medio de la placa cuando se encuentra sometida a esfuerzos de flexión. Debido al cortante, las secciones planas y normales al plano medio de la placa en la situación indeformada permanecen planas, pero no necesariamente normales, al plano medio de la placa en la situación deformada (v. figura 2.5):

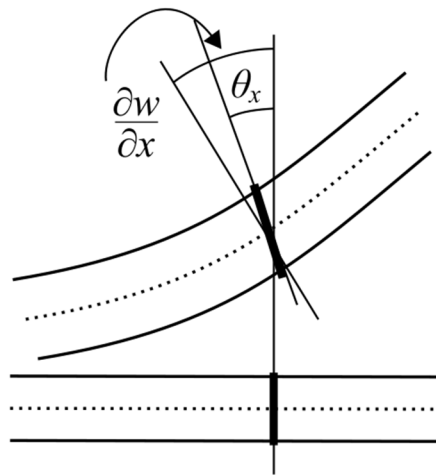


Figura 2.5. Placa deformada según teoría Mindlin-Reissner

Sin embargo, Vesic (1961) comparó previamente ambas teorías (Winkler y Elasticidad) y demostró que ambas se ajustaban perfectamente para el caso de suelos elásticos lineales, aunque por lo general, para cierto nivel de cargas, los comportamientos son no lineales. Mientras que la teoría de Winkler puede adaptarse a suelos no necesariamente elásticos-lineales donde el módulo de balasto k_H varíe con la profundidad, la teoría elástica presentada por Poulos sólo puede utilizarse en condiciones elásticas lineales.

Por la heterogeneidad de los suelos, elegir un valor único del módulo de deformación E y del coeficiente de Poisson ν es una tarea compleja. A menudo, estos parámetros se estiman mediante relaciones indirectas con otras propiedades del suelo y, la teoría de Poulos, es altamente sensible a la variación del módulo E . Esto condiciona a que los resultados arrojados por el método propuesto por Poulos conlleven una gran incertidumbre. Debido a esta exigua precisión en los resultados, este método no será tenido en cuenta para resolver la problemática a la que nos enfrentamos en este TFG.

2.3 Método simplificado CTE, GCOC, ROM-05

2.3.1 Introducción

En España, actualmente, se dispone de una normativa de obligado cumplimiento para obras de edificación (CTE) y de dos guías con recomendaciones constructivas para cimentaciones en obras de carretera (GCOC) y para obras marítimas y portuarias (ROM-05).

Estos tres documentos técnicos, a los que nos referiremos de ahora en adelante como **Normativas**, presentan un método simplificado semianalítico para casos en los que el desplazamiento horizontal no resulte crítico o condicionante o como primera aproximación en tareas de diseño. No obstante, si se decide utilizar el método propuesto, los movimientos horizontales que superen el denominado Estado Límite de Servicio de la estructura deberán ser, al menos, tres veces superiores a los arrojados por dicho método. De no ser así, sería necesario realizar pruebas de carga o modificar el proyecto para soportar mayores movimientos.

Ha de aclararse que las propias normativas recomiendan encarecidamente el uso de procedimientos numéricos para aquellas situaciones donde un desplazamiento horizontal sea crítico o condicionante.

2.3.2 Método simplificado

El método simplificado consiste en la sustitución del pilote por una varilla indeformable de longitud equivalente en cuyo extremo inferior actúan tres muelles que coartan el desplazamiento horizontal, el vertical y el giro (v. **figura 2.6**). De esta manera, se modeliza el problema de interacción pilote-terreno.

Para usar este método es absolutamente necesario que se cumplan una serie de condiciones:

- Terreno homogéneo.
- Pilote libre en cabeza.
- Longitud real del pilote (L) tres veces superior al parámetro z_0 dependiente de la longitud elástica T .

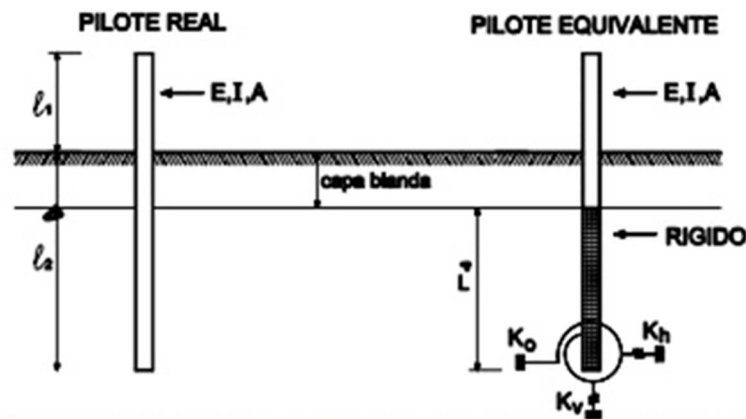


Figura 2.6. Pilote equivalente (Figura F.8 recuperada del CTE)

Pilote

El pilote es modelado en dos partes:

- Parte exenta: corresponde a la parte que está fuera del terreno, si la hubiere. Se representa con una barra con las mismas características mecánicas que las del pilote real. (E_P , I_P , A_P)
- Parte enterrada: se representa con una barra rígida indeformable de longitud $L_{eq} < L$.

Terreno

El terreno es sustituido por tres muelles que coartan el desplazamiento de la varilla rígida. Las constantes elásticas que representan la rigidez del muelle son: K_H para impedir el desplazamiento lateral, K_θ para el giro y K_V para el desplazamiento vertical. Este último, dado que nos centraremos en el desplazamiento lateral y el giro, no lo tendremos en cuenta.

Como se observa en la figura 2.6, la longitud l_2 no incluye la capa blanda. Esto es así porque debe despreciarse la colaboración de suelos superficiales flojos.

Valores de cálculo

A continuación, se recogen las expresiones extraídas de las normativas que permiten calcular los parámetros necesarios para aplicar este método simplificado:

$$L_{eq} = (1.10 - 0.15 \times \ln\left(\frac{l_2}{T}\right)) \times T \geq 0.8T \quad (2.19)$$

$$K_H = (0.68 + 0.20 \times \ln\left(\frac{l_2}{T}\right)) \times \frac{E_P I_P}{T^3} \leq \frac{E_P I_P}{T^3} \quad (2.20)$$

$$K_\theta = (0.30 + 0.20 \times \ln\left(\frac{l_2}{T}\right)) \times \frac{E_P I_P}{T} \leq 0.6 \frac{E_P I_P}{T} \quad (2.21)$$

El valor de longitud elástica T depende del tipo de terreno y de la normativa aplicada en caso del suelo arcilloso. Para un terreno no cohesivo, las tres normativas coinciden.

Valor de T

La expresión del parámetro T en el caso de suelos arenosos es la misma que la recogida en la ecuación (2.18). Aunque todas las normativas proporcionan unos valores de n_H , los valores propuestos por Terzaghi (1955) son más conservadores, así que utilizaremos éstos. (Ver tabla 2.2)

Compacidad de las arenas	Situación respecto al nivel freático	
	Por encima	Por debajo
Floja	2	1,2
Media	5	3
Compacta	10	6
Densa	20	12

Figura 2.7. Valores de n_H propuestos por las normativas

Para la situación de hallarnos en un terreno cohesivo, las normativas difieren en el valor que debe adoptarse para T

CTE:

$$T = \left(\frac{E_P I_P}{67 C_u} \right)^{1/4} \quad (2.22)$$

GCOC:

$$T = \left(\frac{E_P I_P}{75 C_u} \right)^{1/4} \quad (2.23)$$

ROM-05:

$$T = \left(\frac{E_P I_P}{100 C_u} \right)^{1/4} \quad (2.24)$$

Cálculo de desplazamientos

Desplazamiento y giro en la base.

$$y = \frac{H}{K_H} \quad (2.25)$$

$$\theta = \frac{M}{K_\theta} \quad (2.26)$$

Desplazamiento y giro en L_{eq}

$$y_{Leq} = y + \theta L_{eq} \quad (2.27)$$

$$\theta_{Leq} = \theta \quad (2.28)$$

Desplazamiento y giro en parte exenta del pilote (l_1)

$$y_{l1} = y + \theta L_{eq} + \theta l_1 + \frac{H * l_1^3}{3E_P I_P} + \frac{M * l_1^2}{2E_P I_P} \quad (2.29)$$

$$\theta_{l1} = \theta + \frac{H * l_1^2}{2E_P I_P} + \frac{M * l_1}{E_P I_P} \quad (2.30)$$

Donde

$$M = (l_1 + L_{eq})H \quad (2.31)$$

Cálculo de esfuerzos

Los esfuerzos según el método simplificado se calculan aplicando el principio de superposición con las figuras siguientes. Para poder usar estas figuras se tiene que cumplir que $L \geq 3z_0$.

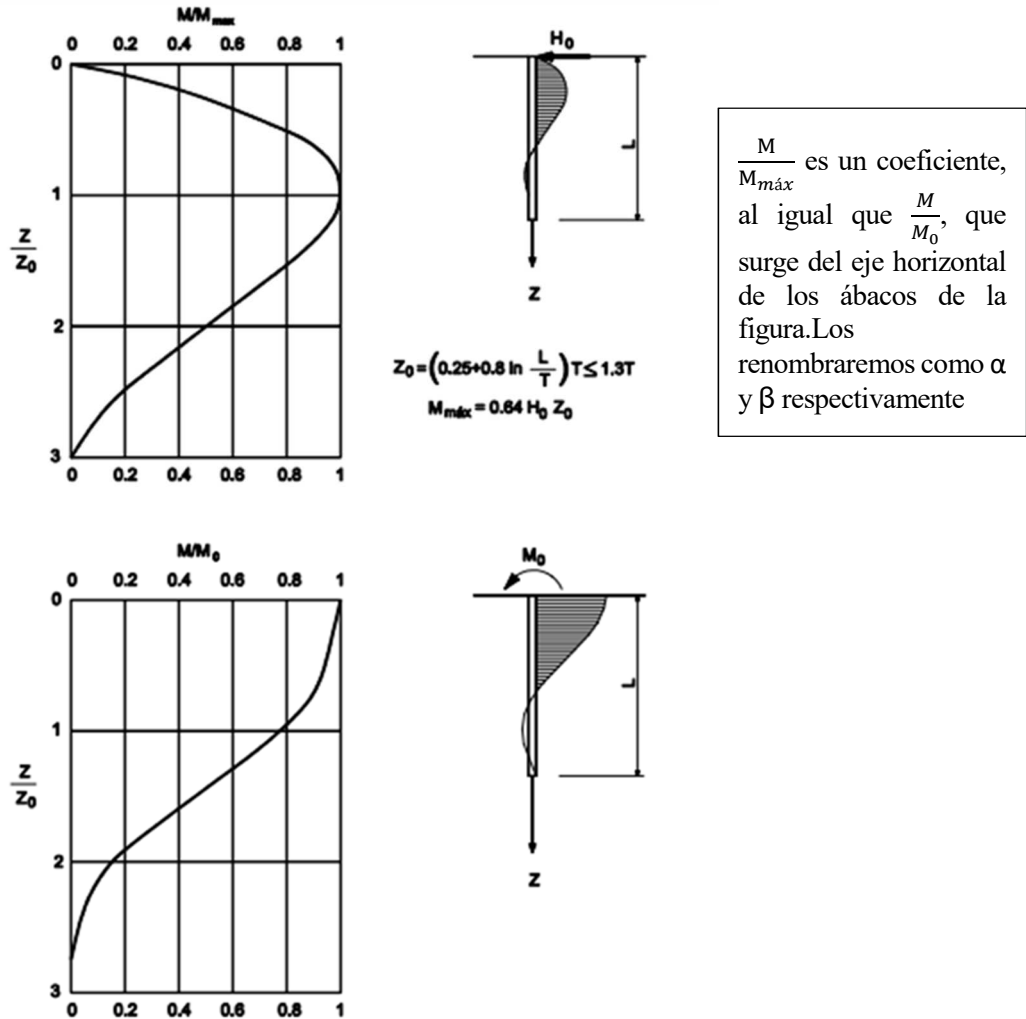


Figura 2.8 Cálculo de esfuerzos según normativas

Los valores de cálculo son los siguientes:

$$z_0 = T(0.25 + 0.80 \ln \left(\frac{L}{T}\right)) \leq 1.3T \quad (2.32)$$

El momento máximo bajo la carga lateral es:

$$M_{\max} = 0.64 * H * z_0 \quad (2.33)$$

Por el principio de superposición, el momento y cortante será:

$$M = \alpha M_{\max} + \beta M_0 \quad (2.34)$$

$$Q = -\frac{\Delta M}{\Delta z} \quad (2.35)$$

No obstante, la ROM-05 propone como valor del cortante $Q=M/M_0 \cdot H$ (art. 3.6.9.2.1 ROM-05) el cual produce una envolvente que no se asemeja a la del resto de modelos. Esta formulación del cortante no ha sido corregida en revisiones posteriores de la ROM-05, por lo que se propone como corrección la expresión recogida en la ecuación (2.35). Esta expresión (2.35) será la que se utilice para estudiar la influencia de los parámetros recogidos en el **apartado 1.2** en el cálculo de los desplazamientos y esfuerzos cuando se aplica una carga lateral y un momento en la cabeza de un pilote aislado

La diferencia entre ambas envolventes se estudiará en el **capítulo 6**, donde compararemos las envolventes de los cortantes para cada modelo.

2.4 Método p - y

2.4.1 Introducción

El método p - y fue introducido por primera vez por McClelland y Focht (1958). Bajo la teoría de Winkler, este método relaciona la resultante del empuje del terreno circundante, o presiones del suelo, (p) con la deformada que sufre el pilote (y) a partir del comportamiento que presentan los suelos cohesivos y no cohesivos en ensayos de laboratorio y de campo. Dichos comportamientos o curvas permiten obtener el valor del módulo de rigidez horizontal del suelo k_H . Generalmente, estas curvas son no lineales y varían arbitrariamente con la profundidad, por lo que el módulo del suelo también dependerá de la profundidad de manera arbitraria. Se muestra en la figura 2.9 la variación del módulo k_H con la profundidad.

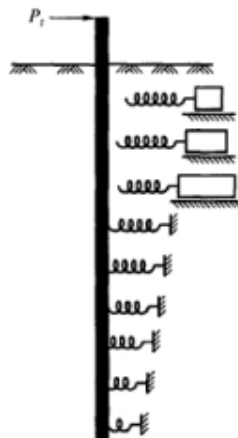


Figura 2.9. Representación de la variación de k_H con la profundidad.

El modelo p - y supone para una sección transversal de un pilote enterrado sometido a cargas y momentos (figura 2.10.a) que la distribución de tensiones es uniforme cuando el pilote no experimenta ningún desplazamiento ni se ve sometido a una fuerza (figura 2.10.b). Sin embargo, cuando el pilote experimenta un desplazamiento y_l , el suelo circundante se ve sometido a una resultante de tensiones y compresiones (figura 2.10.c). Si repetimos este concepto para distintas profundidades, tendremos un vector de desplazamientos y otro de fuerzas por unidad de longitud del pilote que, combinándolos, resultan en una curva p - y .

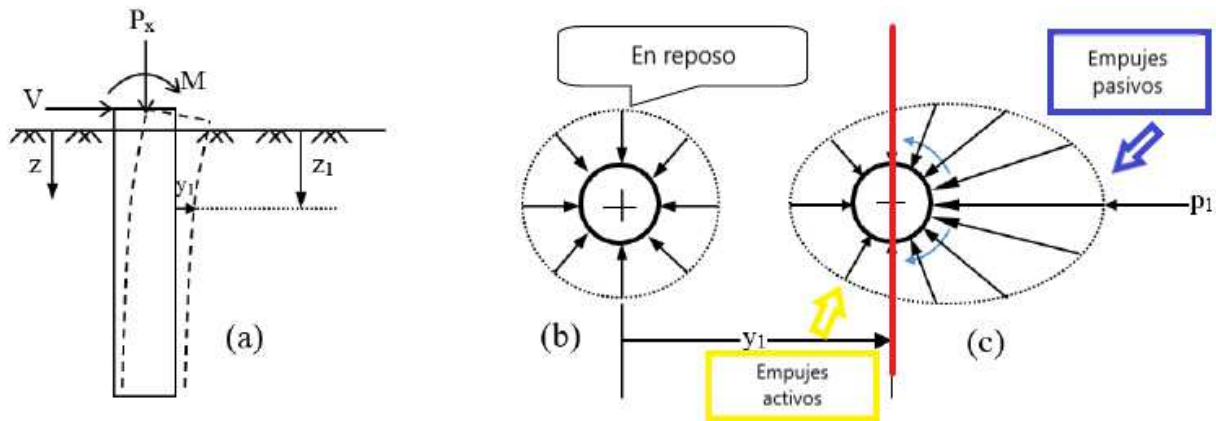


Figura 2.10. Representación gráfica del concepto p - y .

El método p - y intenta resolver la problemática de pilotes sometidos a cargas laterales utilizando la ecuación de la viga elástica (2.3). Como el módulo k_H varía con la profundidad al igual que las propias curvas, es necesario un *software* que, siguiendo un método numérico, resuelva la ecuación (2.3) y genere valores de desplazamientos y esfuerzos.

Un buen método es el de las diferencias finitas que permite llegar a una solución mediante sucesivas iteraciones tras discretizar el pilote en n elementos de longitud h . En resumen, el proceso iterativo consiste en:

- Se considera el módulo k_H constante a lo largo del fuste del pilote.
- Se resuelven las ecuaciones diferenciales para obtener la deformada en cada profundidad z (y).
- De la curva p - y y valores de la deformada y , se determina el valor de p para cada profundidad z .
- Con p e y se calcula el nuevo módulo k_H . El proceso continua hasta que converja el sistema.

El *software* RSPILE tiene en cuenta este método iterativo para el cálculo.

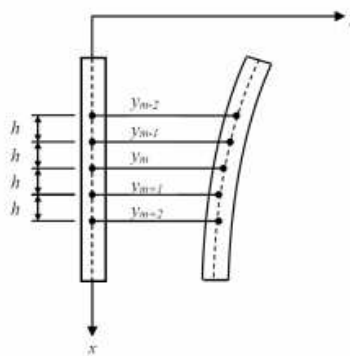


Figura 2.11. Discretización del pilote en n segmentos

En base a ensayos de laboratorio, de campo e instrumentación instalada a lo largo del pilote diversos autores han formulado curvas p - y para distintos terrenos. Destacan fundamentalmente los siguientes:

Tipo de suelo	Autor/es
Arcilla blanda sumergida	Matlock (1970)
Arcilla sobreconsolidada seca	Reese et al. (1975)
Arcilla sobreconsolidada sumergida	Reese et al. (1975)
Arena seca o sumergida	Reese et al. (1974)

Tabla 2.3. Curvas p - y y autores.

A efectos de este Trabajo Fin de Grado, las arcillas se considerarán normalmente consolidadas, por lo que sólo nos centraremos en las curvas propuestas por Matlock (1970) para estos materiales y por Reese et al. (1974) para arenas.

2.4.2 Curva p - y de Matlock (1970).

Matlock propone para arcillas blandas la siguiente curva p - y :

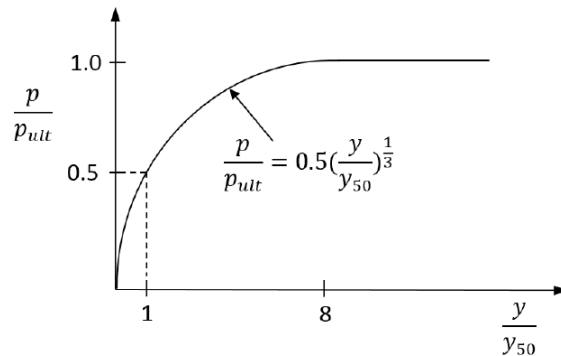


Figura 2.12. Curva de Matlock (1970) para arcillas blandas.

Las ecuaciones que describen la variación de la presión última (p_{ULT}) con la deformación del pilote para una profundidad particular y el desplazamiento correspondiente al 50% de la deformación será:

$$p_{ULT} = \min\left[\left(3 + \frac{\gamma'}{C_u}z + \frac{J}{d}z\right)C_u d; 9C_u d\right] \quad (2.36)$$

$$y_{50} = 2\varepsilon_{50}d \quad (2.37)$$

Donde:

- ε_{50} : deformación correspondiente al 50% de la tensión desviadora en rotura obtenida a partir de los ensayos triaxiales sin drenaje ni consolidación.
- J : Factor determinado experimentalmente por Matlock igual a 0.5.

Valores representativos de ε_{50} para arcillas normalmente consolidadas fueron determinados por Peck et al. (1974). Estos valores estaban relacionados con la resistencia a cortante a corto plazo de las arcillas.

Consistencia de la arcilla	Resistencia media al corte sin drenaje de la arcilla. [kPa]	ε_{50}
Blanda	<48	0.020
Media	48-96	0.010
Firme	96-192	0.005

Tabla 2.4. Valores representativos de ε_{50} para arcillas normalmente consolidadas.

2.4.3 Curva p-y de Reese et al. (1974) para arenas.

Reese et al. proponen en 1974 una curva válida tanto para arenas por encima del NF como sumergidas:

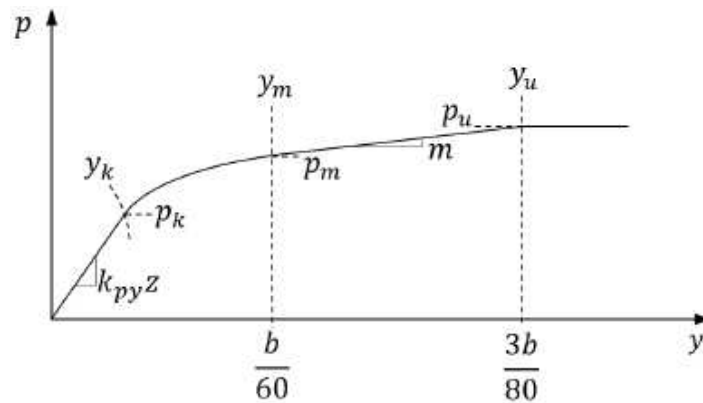


Figure 5-5: p-y curve for Sand

Figura 2.13. Curva de Reese et al. (1974) para arenas.

La curva **p-y** obtenida a partir de ensayos e instrumentación instalada tiene dos particularidades:

- Si y_u es menor que y_k , entonces la curva **p-y** es lineal desde el origen hasta su máximo valor (y_u, p_u) .
- Es necesario estimar dos coeficientes, A_s y B_s , a partir de gráficas.

Para poder usar esta curva es necesario conocer los siguientes parámetros del terreno:

- Ángulo de rozamiento ϕ .
- Peso específico del terreno, tanto aparente como saturado (γ, γ_{SAT}) .
- Coeficiente k_{PY} que define la pendiente inicial de la curva **p-y** y depende de la compacidad de la arena y de la existencia del NF. Algunos valores representativos de este coeficiente se recogen en la tabla siguiente:

Compacidad de la arena	Arena sumergida	Arena seca
Floja	5.4	6.8
Media	16.3	24.4
Densa	34	61

*Valores en $[MN/m^3]$

Tabla 2.5. Valores representativos de k_{PY}

Las expresiones que definen los parámetros **p** de la curva son las siguientes:

$$p_u = A_s p_s \quad (2.38)$$

$$p_m = B_s p_s \quad (2.39)$$

El valor de p_s será el mínimo de los dos siguientes:

$$p_s = \gamma z \left[\frac{K_0 z \tan \phi \sec \beta}{\tan(\beta - \phi) \cos \alpha} + \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \phi)} (d + z \tan \beta \tan \alpha) + K_0 z \tan \beta (\tan \phi \sec \beta - \tan \alpha) - K_a d \right] \quad (2.40)$$

$$p_s = \gamma z d K_a (\tan^8 \beta - 1) + K_0 d \gamma z \tan \phi \tan^4 \beta \quad (2.41)$$

Los parámetros que aparecen en (2.39) y (2.40) son los siguientes:

$$K_0 = 0.4 \quad (2.42)$$

$$K_a = \tan^2(45 - \frac{\phi}{2}) \quad (2.43)$$

$$\alpha = \frac{\phi}{2} \quad (2.44)$$

$$\beta = 45 + \frac{\phi}{2} \quad (2.45)$$

Por último, las gráficas que definen los factores de ajuste A_S y B_S se muestran a continuación:

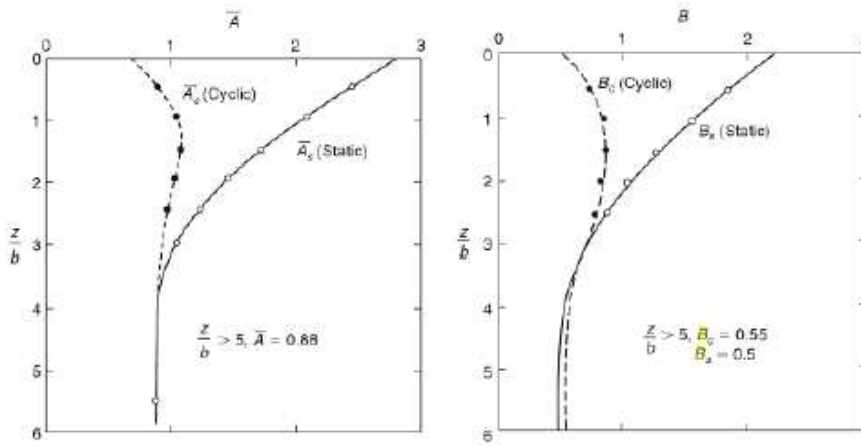


Figure 5-6: Coefficients for soil resistance versus depth (Reese & Van Impe, 2011)

Figura 2.14. Factores de ajuste A_S y B_S en función de la profundidad.

2.5 El Método de los Elementos Finitos

2.5.1 El MEF

El Método de los Elementos Finitos es una aproximación numérica basada en la teoría de la Elasticidad. Se emplea actualmente para resolver de manera aproximada problemas relacionados con fenómenos físicos cuya formulación y/o geometría no permiten encontrar una solución analítica. En este trabajo, se utilizará para modelar la interacción suelo-pilote, considerando el suelo como un medio elastoplástico.

La primera de las ideas fundamentales en las que se basa el MEF es la discretización del dominio. Para ello, se descompone éste en un número discreto de nodos. Sabiendo el desplazamiento de los nodos, podemos conocer el desplazamiento de cualquier otro punto del dominio.

Otra de las ideas fundamentales en las que se basa el MEF es el Teorema de los Trabajos Virtuales:

$$W_e = \sum_{i=1}^n F_i \delta_i = W_i = \int_V \left(\sum_{i,j} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \right) dV$$

La expresión precedente se puede expresar, en palabras de Federico París Carballo, de la siguiente forma:

Dado un sistema de tensiones σ_{ij} en equilibrio con un sistema de cargas externas F_i y un campo de desplazamientos δ_i (que no tiene porqué corresponder al provocado por las cargas exteriores) con sus correspondientes deformaciones compatibles ε_{ij} , el trabajo de las tensiones σ_{ij} sobre las deformaciones ε_{ij} (trabajo de variables internas), es igual al trabajo de las cargas exteriores F_i sobre los desplazamientos δ_i (trabajo de variables externas). (París, 1996, p. 202).

Por lo tanto, si queremos hallar el campo de desplazamientos \mathbf{u} de los nodos del dominio, la expresión integral anterior debe ser válida para todo campo de desplazamientos compatible. Esto es sumamente complejo, ya que lo relativo al dominio en la expresión anterior es el campo de tensiones σ_{ij} . Es necesario pues, expresar el campo de tensiones σ_{ij} en términos de desplazamientos de los nodos. Esto se consigue introduciendo la ley de comportamiento (σ - ε) y la relación ε - \mathbf{u} en la expresión anterior. De esta manera, la única incógnita que tendríamos es el campo de desplazamientos \mathbf{u} :

$$\sigma = D \times \varepsilon \quad (2.46)$$

$$\varepsilon = B \times \mathbf{u} \quad (2.47)$$

Donde D es la matriz constitutiva del material y B la matriz de deformación.

$$D = \frac{E(1+\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{pmatrix} 1 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{(1-\nu)} & 1 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{(1-\nu)} & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{pmatrix} \quad (2.48)$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (2.49)$$

Por otro lado, para simplificar el campo de desplazamientos \mathbf{u} , vamos a expresarlo en función de unas funciones aproximantes ϕ . De esta manera, descompondríamos el campo de desplazamientos en tres direcciones, asociando a cada nodo unas funciones aproximantes:

$$\mathbf{u} = \phi * \mathbf{a}$$

$$u = \begin{pmatrix} \phi_1 & 0 & 0 & \phi_n & 0 & 0 \\ 0 & \phi_1 & 0 & \dots & 0 & \phi_n \\ 0 & 0 & \phi_1 & 0 & 0 & \phi_n \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ \vdots \\ a_{n1} \\ a_{n2} \\ a_{n3} \end{pmatrix} \quad (2.50)$$

El campo de desplazamientos virtuales δ_i también sigue la misma forma que los desplazamientos u , dependen de unas funciones de forma N que definen de manera única el campo de deformaciones virtuales ε_{ij} . Como estas funciones de forma N las elegimos nosotros, si definimos las funciones aproximantes ϕ de manera idéntica a las funciones N , la expresión integral quedaría simétrica

$$K = \int N^T B^T D B N dv \quad (2.51)$$

Puesto que sobre las funciones N actúa la matriz B , éstas pueden ser simplemente funciones lineales. Tendríamos por tanto que $F=Ku$ y el sistema quedaría resuelto. Conociendo el campo de desplazamientos u REAL del dominio al que nos enfrentamos (el conjunto terreno-pilote en nuestro caso), podemos conocer las deformaciones ε y las tensiones σ que sufren.

2.5.2 El elemento *pilote embebido* de PLAXIS

Debido a que la distribución de tensiones y deformaciones alrededor de los pilotes es completamente tridimensional, es imposible modelar este patrón de manera fiable en un modelo bidimensional. Esto quiere decir que el elemento *pilote embebido* es una simple aproximación de las condiciones 3D en deformación plana.

La idea detrás de este elemento 2D es la de un pilote representado mediante un elemento *viga* basado en la teoría de vigas de Mindlin (o formulación de Timoshenko para barras) que considera la producción de deformaciones transversales debido al cortante. Este pilote no se encuentra dentro de un mallado bidimensional; sin embargo, el suelo alrededor sí. En otras palabras, el elemento *pilote embebido* es un elemento 3D en un modelo 2D.

Debido a esta “incongruencia”, es necesario disponer de una interfaz especial que conecte la parte del pilote situada fuera del plano con el suelo circundante. Como es sabido, un pilote ofrece dos resistencias: una a lo largo del fuste y otra en la punta. Para modelar esta interacción terreno-pilote, la interfaz se compone de 3 tipos de muelles: uno para coartar el movimiento vertical del fuste, otro para coartar el movimiento lateral de éste y un tercero para coartar los movimientos en la punta. Mientras que los dos primeros se centran en nodos que estén en el plano bidimensional, el último conecta punto a punto toda la base del pilote y ejerce la función de unir un elemento 3D en un modelo 2D.

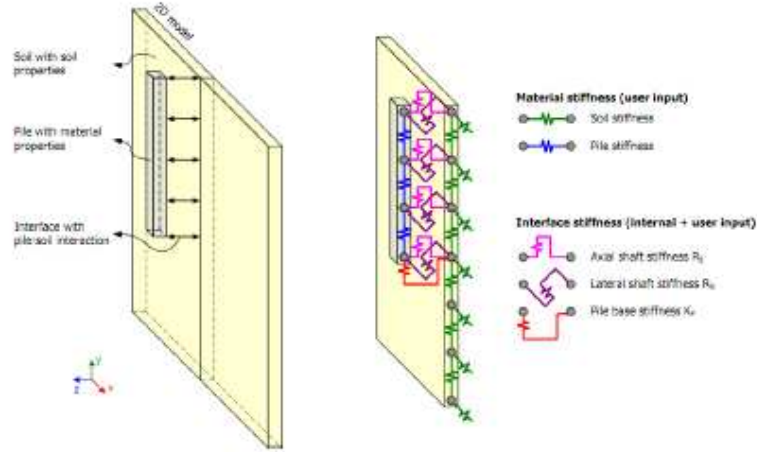


Figure 5.23 Embedded beam interaction with soil (after Sluis (2012))

Figura 2.15. Interacción suelo-estructura.

Sin embargo, y aunque se ha conseguido modelar la mencionada interfaz especial, el propio manual de PLAXIS recomienda no usar el elemento *pilote embebido* en caso de cargas laterales (Manual de Referencias de PLAXIS 2D, 2018, p. 248). No obstante, en este Trabajo Fin de Grado sí se utilizará ya que también se desea verificar si los métodos numéricos son correctos.

Valores de cálculo

Las expresiones que determinan la interfaz especial se exponen a continuación:

$$R_s = ISF_{RS} \times \frac{G_s}{L_s} \quad (2.52)$$

$$R_n = ISF_{RN} \times \frac{G_s}{L_s} \quad (2.53)$$

$$K_f = ISF_{KF} \times \frac{G_s * R_{eq}}{L_s} \quad (2.54)$$

$$\frac{ISF_{KF}}{10} = ISF_{RS} = ISF_{RN} = 2.5 \times \left(\frac{L_s}{D_{eq}} \right)^{-0.75} \quad (2.55)$$

$$D_{eq} = 2R_{eq} = \sqrt{12 \frac{I_p}{A_p}} \quad (2.56)$$

Donde $G_s = \frac{E}{2(1+\nu)}$

Las propiedades que definen el material de este elemento son:

- E_p .
- ν_p .
- Sección transversal del pilote y resto de propiedades que dependen de ésta: $d/lado$, A_p , I_p .

2.5.3 El elemento placa de PLAXIS (Axilsimétrico)

Lo primero que se hará en este apartado es la de explicar el porqué de utilizar un modelo axilsimétrico en caso de usar una placa.

Si consideramos un modelo en Deformación Plana, los desplazamientos y deformaciones en la dirección transversal o fuera de plano se consideran nulos. Sin embargo, en un modelo Axilsimétrico, todo desplazamiento radial provoca deformaciones en la dirección circunferencial. Esto a su vez provoca que las tensiones sean no nulas en dicha dirección. Por lo tanto, mientras que en Deformación Plana las componentes del vector de deformación son $[\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}]$, en el modelo axilsimétrico debemos tener en cuenta una componente extra que dependa del ángulo de giro θ y nos otorgue ese “carácter tridimensional” que buscamos en un pilote: $[\epsilon_r, \epsilon_y, \epsilon_\theta, \gamma_{ry}]$. De igual manera, tendremos una componente extra en el vector de tensiones $[\sigma_r, \sigma_y, \sigma_\theta, \tau_{ry}]$.

Ha de aclararse que, pese a que el estado de cargas no es radial, también se desea verificar si los métodos numéricos son del todo correctos.

El uso de placas está justificado en el caso de estructuras esbeltas en el terreno que presenten rigidez a flexión y a esfuerzos normales. Ejemplos de estas estructuras pueden ser muros, placas o láminas que se extiendan en la dirección transversal o un pilote propiamente dicho.

En el modelo de elementos finitos en 2D, las placas están formadas por elementos *viga* basados en la teoría de vigas de Mindlin, por lo que también se tienen en cuenta con este elemento la deformación debida al esfuerzo cortante además de la producida por la flexión. La rigidez a cortante se determina de la siguiente manera:

$$Rigidez\ a\ cortante = \frac{5E_p A_p}{12(1 + \nu)} \quad (2.57)$$

Las propiedades que definen el material del elemento placa son las siguientes:

- Rigidez axial $E_p A_p$ [kN]
- Rigidez a flexión $E_p I_p$ [kNm²]
- Espesor de la placa equivalente d_{eq} (ver ecuación 2.56). Esto implica que la placa se modeliza como si fuera de sección rectangular.
- Peso de la placa w . Este peso w se define de la siguiente forma:

$$w = (\gamma_{material} - \gamma_{suelo}) \times d \quad (2.58)$$

3 CARACTERIZACIÓN DEL TERRENO Y PILOTE

3.1 Caracterización del terreno

3.1.1 Modelo constitutivo

El modelo constitutivo del terreno utilizado será el de Mohr-Coulomb. Este modelo se utiliza como una primera aproximación al comportamiento general del suelo. Este modelo se basa en cinco parámetros:

- Módulo de deformación en carga E que se utiliza como un módulo de rigidez básico.
- Coeficiente de Poisson ν .
- Cohesión c .
- Ángulo de rozamiento ϕ .
- Ángulo de dilatación ψ .

El modelo Mohr-Coulomb es un modelo de plasticidad perfecta no asociada; es decir, los incrementos de deformación no son vectores perpendiculares a la superficie de fluencia. Por lo tanto, existe una función de fluencia que depende del ángulo de rozamiento y una función de potencial plástico que depende de la dilatación.

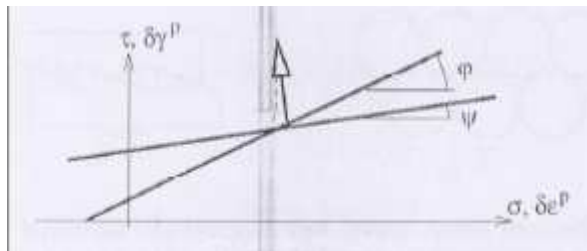


Figura 3.1. Diferencia entre superficie de fluencia y potencial plástico

La superficie de fluencia determina el conjunto de tensiones máximas admisibles. En el modelo Mohr-Coulomb, ésta se obtiene del círculo de Mohr en tensiones y de la envolvente (resistencia al corte en rotura del suelo).

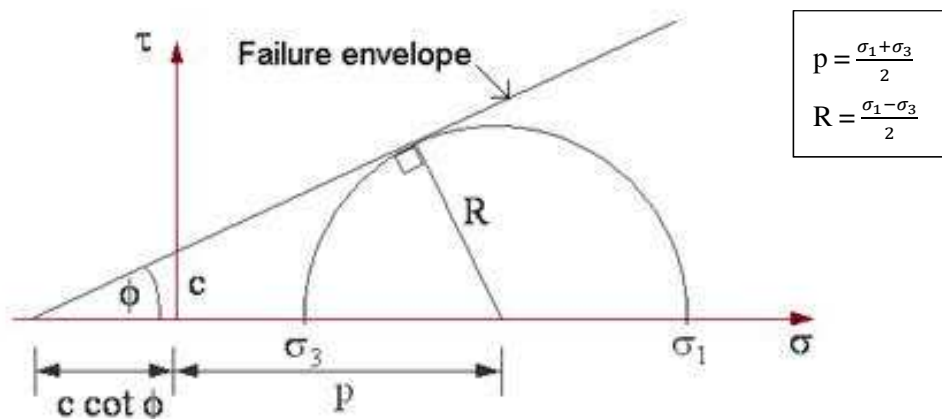


Figura 3.2. Círculo de Mohr en tensiones

Envolvente:

$$\tau = c + \sigma_m \tan(\phi) \quad (3.1)$$

La envolvente puede ser expresada en términos de las tensiones σ_1 y σ_3

$$R * \cos(\phi) = c + [p - R * \sin(\phi)] * \tan(\phi)$$

$$\downarrow$$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = c * \cos(\phi) + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin(\phi) \quad (3.2)$$

Función de fluencia:

$$f = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - c * \cos(\phi) - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin(\phi) \quad (3.3)$$

La superficie del potencial plástico nos permite obtener los incrementos de deformación plástica que se producen con los incrementos de tensión. Esta superficie tiene idéntica forma que la superficie de fluencia, pero depende del ángulo de dilatación ψ .

$$g = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - c * \cos(\psi) - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin(\psi) \quad (3.4)$$

3.1.2 Arcillas

Para terrenos arcillosos, el análisis crítico se considera en principio que es a Corto Plazo, en condiciones no drenadas. El parámetro determinante será, por tanto, la resistencia al corte sin drenaje C_u . A continuación, se recogen en la tabla 3.1. los valores que se utilizarán para los cálculos. Estos valores se han obtenido de la **tabla 2.4.3** de la **ROM-05**

Consistencia del terreno	Valor de C_u [kPa]
Blanda	40
Media	80
Firme	100

Tabla 3.1. Valores de C_u utilizados.

Para la metodología de las curvas p - y , es necesario definir 3 parámetros más:

- Deformación ϵ_{50} : ver Tabla 2.4.
- Peso específico aparente γ .
- Peso específico saturado γ_{SAT} .

Los valores de los pesos específicos son valores medios recomendados por la bibliografía existente.

Consistencia del terreno	Peso específico aparente γ [kN/m ³]	Peso específico saturado γ_{SAT} [kN/m ³]
Blanda	16	19
Media	16	19
Firme	21	22

Tabla 3.2. Valores del peso específico (arcillas)

Por otro lado, el *software* PLAXIS 2D necesita, además, los siguientes parámetros para modelizar el terreno según un análisis *No drenado tipo B*: módulo E , coeficiente de Poisson ν e índice de poros e .

Los parámetros e y ν se han obtenido de la **tabla 2.4.3** de la **ROM-05**.

	Tipo de suelos	Consistencia	Índice de poros (2)	Resis. al corte sin drenaje (6) (kPa)	Resistencia con drenaje C(kPa) (ϕ^0)		Módulo de deformación (5) drenado (MPa)	Coefficiente de permeabilidad (3) (cm/s)
Suelos cohesivos	Limos de granulometría uniforme con algo de arena y arcilla	Dura o firme	0,40	100	50	30	40	10^{-6}
		Media	0,60	60	20	25	15	
		Blanda	0,80	20	10	20	7	
		Muy blanda	I	10	0	18	2	
	Arcilla y limos arcillosos. Pueden contener gravas y/o arenas en proporciones menores del 70%	Dura o firme	0,35	>100	50	28	50	10^{-8}
		Media	0,50	80	20	23	20	
		Blanda	0,70	40	10	19	5	
		Muy blanda	I	20	0	15	I	

Figura 3.3. Tabla 2.4.3 recuperada de la ROM-05 (arcilla)

El comentario (5) especifica lo siguiente: “(5) El módulo de Poisson puede tomarse entre 0,30 para los suelos densos y 0,40 para los más flojos o blandos.” Atendiendo a esta información, los valores del módulo de Poisson serán:

Consistencia del terreno	Valor de ν
Blanda	0.40
Media	0.35
Firme	0.30

Tabla 3.3. Valores del coeficiente de Poisson (arcillas)

Debido a que los valores del módulo de deformación E son muy elevados, se decidió modificarlos. Los valores utilizados son los recomendados por la bibliografía existente para este tipo de materiales en condiciones normal y ligeramente sobreconsolidados.

Consistencia del terreno	Valor de E_d [kPa]
Blanda	1500
Media	5000
Firme	10000

Tabla 3.4. Valores del módulo E (arcillas).

3.1.3 Arenas

Para terrenos no cohesivos, el análisis se realizará en condiciones a Largo Plazo o drenadas. Los parámetros, por tanto, estarán en términos efectivos.

Los parámetros que caracterizan un terreno arenoso son los siguientes:

- Peso específico aparente γ .
- Peso específico saturado γ_{SAT} .
- Módulo de deformación E' (PLAXIS).
- Coeficiente de Poisson ν' (PLAXIS).
- Ángulo de rozamiento ϕ .
- Ángulo de dilatación ψ' ($\psi' = \phi - 30^\circ$) (PLAXIS).
- Índice de poros e (PLAXIS).

- Cohesión c' : se tomará nula, en cualquier caso.
- Coeficiente de reacción n_H . (Broms y Normativas).
- Factor k_{py} : ver Tabla 2.5.

Los valores de los pesos específicos son valores medios recomendados por la bibliografía existente.

Compacidad del terreno	Peso específico aparente γ [kN/m ³]	Peso específico saturado γ_{SAT} [kN/m ³]
Floja	17	20
Media	20	23
Densa	21	23

Tabla 3.5. Valores del peso específico (arenas)

Los valores del módulo de deformación E' , del coeficiente ν' , el ángulo de rozamiento ϕ' , el ángulo de dilatación ψ' y el índice de poros e se han tomado de la **tabla 2.4.3** de la **ROM-05**

	Tipo de suelos	Compacidad	Índice de poros (2)	Cohesión (kPa)	Ángulo de Rozamiento (ϕ°)	Módulo de deformación (5) drenado (MPa)	Coeficiente de permeabilidad (3) (cm/s)
Suelos granulares (1)	Gravas y arenas limpias (arenas > 10%)	Densa	0,25	0	45	100	10^{-2}
		Media	0,35	0	40	50	
		Floja	0,45	0	35	20	
		Muy floja	0,60	0	30	10	
	Gravas y arenas con algo de limos y/o arcillas (5-10%) (4)	Densa	0,20	10	40	50	10^{-3}
		Media	0,30	5	35	20	
		Floja	0,40	2	30	10	
		Muy floja	0,60	0	27	5	
	Gravas y arenas con gran contenido en suelos finos (5-10%) (4)	Densa	0,15	20	35	50	10^{-4}
		Media	0,25	10	30	20	
		Floja	0,35	5	27	10	
		Muy floja	0,50	0	25	5	
Reellenos artificiales	Banquetas de todo-uno vertidas y esolleras de granulometría continua (sucias)	Floja	0,50	0	40	10	1
		Muy floja	0,70	0	35	5	

Figura 3.4. Tabla 2.4.3 recuperada de la ROM-05 (arena).

Los valores del coeficiente de Poisson ν se han determinado de igual manera atendiendo al comentario (5): “(5) El módulo de Poisson puede tomarse entre 0,30 para los suelos densos y 0,40 para los más flojos o blandos.”. Por otro lado, los valores del ángulo de dilatación se tomarán como previamente se ha descrito: $\Psi' = \phi' - 30^\circ$

Compacidad del terreno	Valor de ν'	Ángulo de dilatación Ψ' [°]
Floja	0.40	0
Media	0.35	5
Densa	0.30	10

Tabla 3.6. Valores del coeficiente de Poisson y del ángulo de dilatación (arenas).

Para calcular los valores del coeficiente de reacción n_H es necesario conocer el peso específico γ del suelo y el coeficiente A adoptado por Terzaghi. El peso específico ya lo tenemos determinado dependiendo de la compacidad de la arena, por lo que tenemos que determinar aún los valores de A .

Atendiendo a la **tabla 2.2**, los valores de A dependen de la densidad relativa del terreno considerado y del número de golpes N del ensayo SPT. Gracias a la **figura D.1 del CTE**, podemos relacionar el número N_{SPT} con el ángulo de rozamiento ϕ' .

Sin embargo, esto no es suficiente ya que sólo confirmaríamos que los ángulos de rozamiento están elegidos razonablemente y que, efectivamente, para una arena densa, por ejemplo, el ángulo de rozamiento ϕ' puede llegar a ser de 40° . Debemos estimar los valores del coeficiente A . Para ello, vamos a suponer que existe una relación lineal entre el rango de valores de A de la tabla 2.2. Imponiendo esta condición, podemos determinar una función lineal que nos permita este coeficiente en función del número N_{SPT} .

Arena muy floja ($N_{SPT} \leq 0-4$)

$$A = 25 * N_{SPT} \quad (3.5)$$

Arena floja ($4 \leq N_{SPT} \leq 10$)

$$A = \frac{100}{3} * (N_{SPT} - 1) \quad (3.6)$$

Arena media ($10 \leq N_{SPT} \leq 30$)

$$A = 35 * N_{SPT} - 50 \quad (3.7)$$

Arena densa ($30 \leq N_{SPT} \leq 50$)

$$A = 50 * (N_{SPT} - 10) \quad (3.8)$$

Teniendo en cuenta los valores del ángulo de rozamiento de los distintos terrenos, el coeficiente A y el coeficiente de reacción n_H serán los siguientes:

Compacidad del terreno	Valor de N_{SPT}	Valor de A	Coeficiente de reacción n_H [kN/m ³]
Floja	10	300	3777.78
Media	26	860	12740.74
Densa	46	1800	28000
Media (con NF)	26	860	8402.52

Tabla 3.7. Valores utilizados de A y n_H (arenas)

3.1.4 Otras características del terreno.

- Terreno homogéneo.
- No existe capa blanda superficial.
- Mallado “fino” (PLAXIS).
- Espacio geométrico (PLAXIS) de 100m x 100m para minimizar los efectos de borde. Esta dimensión se ha escogido siguiendo las recomendaciones de Quintero, Rodríguez y Rivero (2016) que consideran un espacio geométrico mínimo de ancho 22 veces el diámetro del pilote y 1.7 veces su longitud en dirección vertical. Teniendo en cuenta que nuestro pilote más largo tendría una longitud de 30m y el de mayor sección un diámetro de 1.5m, con un espacio de 100m x 100m los efectos de borde son mínimos.
- Espesor del terreno de 40m (RSPILE).

3.2 Caracterización del pilote

3.2.1 Propiedades generales

- Longitud libre (e) = 0.5m.
- Sección maciza circular.
- Cabeza libre, no empotrada ni articulada.
- Fuerza aplicada en cabeza de 400 kN. Por consiguiente, se aplica un momento flector de 200 kNm.
- Pilotes perforados. Esta elección de la tipología constructiva se debe a que, según el manual de referencias de PLAXIS 2D (2018, p. 248) y Dao (2011), el elemento *pilote embebido* es adecuado para pilotes cuya construcción no altere en demasía el suelo de alrededor, tal y como ocurre con algunos pilote perforados.
- Comportamiento del pilote en régimen elástico.
- I_P : momento de inercia del pilote. Como la sección es circular, el momento $I_P = \frac{\pi \cdot d^4}{64}$
- Diámetros considerados: 0.85m – 1.00m – 1.25m – 1.50m.
- Longitudes consideradas: 15m – 20m – 25m – 30m.
- Resistencia por punta R_{PK} y resistencia por fuste por metro lineal de pilote $R_{FK/m}$. Va a depender del tipo de terreno, del diámetro y longitud del pilote y del material de éste. Para arenas se aplicará el método de las presiones efectivas, mientras que para arcillas se aplicará el método de las presiones totales para el análisis a corto plazo; ambos recogidos en las diferentes normativas.
- Los parámetros E_P , ν y γ_P se determinarán en función del material del pilote.

3.2.2 Características del pilote de acero

El pilote de acero tendrá las siguientes características invariables:

Parámetro	Valor	Unidades
Módulo de deformación E_p	210,000	MPa
Coefficiente de Poisson ν	0.30	-
Peso específico γ_p	76.93	kN/m ³

Tabla 3.8. Características del pilote de acero

3.2.3 Características del pilote de hormigón armado HA-45

Para determinar las características del pilote de hormigón debemos consultar la EHE-08.

La EHE-08 establece en su artículo 39.6 un valor del módulo de deformación longitudinal secante E_{cm} en función de la resistencia media a compresión del hormigón, f_{cm} , a los 28 días de edad.

$$E_{cm} = 8500 \sqrt[3]{f_{cm}} = 31928 \text{ MPa} \quad (3.9)$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 53 \quad (3.10)$$

Siendo f_{ck} la resistencia característica del hormigón a la misma edad.

El pilote de hormigón armado tendrá las siguientes características invariables:

Parámetro	Valor	Unidades
Módulo de deformación E_p	31,928	MPa
Coefficiente de Poisson ν	0.20	-
Peso específico γ_p	25	kN/m ³

Tabla 3.9. Características del pilote de hormigón armado

3.2.4 Método de las presiones efectivas

Este método establece que la resistencia unitaria por punta q_p para un pilote perforado es:

$$q_p = 0.5 * 3 * \sigma'_{vp} * N_q * f_D \leq 20 \text{ MPa} \quad (3.11)$$

Donde σ'_{vp} es la presión efectiva al nivel de la punta del pilote antes de instalarlo.

$$N_q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} * e^{\pi \tan \phi} \quad (3.12)$$

$$f_D = 1 - \frac{d}{3} \quad (3.13)$$

El valor de σ'_{vp} crece con la profundidad hasta que alcanza un valor donde se hace cte. Esta profundidad se denomina profundidad crítica L_c .

$$L_c = 2d\sqrt{N_q} \quad (3.14)$$

Por otro lado, establece que la resistencia unitaria por fuste τ_f tiene la siguiente expresión:

$$\tau_f = \sigma'_{vp} * K_f * f * \tan \phi \leq \tau_{flim} \quad (3.15)$$

- K_f es el coeficiente de empuje empírico:
 - o $K_f = 0.75$ para pilotes hincados.
 - o $K_f = 0.50$ para pilotes perforados.
- f es el factor de reducción del rozamiento del fuste
 - o $f = 1$ para pilotes hormigonados in situ, hincados o de madera.
 - o $f = 0.8$ para pilotes de acero.
- τ_{flim} se suele limitar a los siguientes valores
 - o $\tau_{flim} \leq 125$ kPa en pilotes hincados.
 - o $\tau_{flim} \leq 90$ kPa en pilotes perforados.

3.2.5 Método de las presiones totales

El método de las presiones totales establece el siguiente método para determinar la resistencia unitaria por punta y la resistencia unitaria por fuste.

$$q_p = 9C_u \quad (3.16)$$

$$\tau_f = \frac{100C_u}{100 + C_u} \quad (3.17)$$

Para pilotes con fuste de acero, el valor de τ_f se afecta por un coeficiente reductor de 0.80.

4 MÉTODO NORMATIVO Y ANALÍTICO (BROMS). CÁLCULO DE DESPLAZAMIENTOS Y ESFUERZOS DE UN PILOTE AISLADO CARGADO LATERALMENTE Y SU EVOLUCIÓN.

4.1 Introducción

En este cuarto capítulo se procede a analizar los resultados según el método de Broms y el método semianalítico normativo cuando se aplican cargas laterales a un pilote aislado en terrenos arcillosos y granulares. Para ello, se procederá a analizar cómo cambian esfuerzos y desplazamientos cuando se modifica alguno de los parámetros definidos en el apartado 1.2.

Debido a que el valor de T difiere en cada normativa cuando nos encontramos ante un terreno arcilloso, sólo analizaremos los desplazamientos y esfuerzos proporcionados por la ROM-05. Elegimos esta normativa porque el valor de T definido por la ROM-05 es el menor de los propuestos por las diferentes normativas. Esto se traduce, a su vez, en una mayor rigidez lateral K_H y en una mayor rigidez frente al giro K_θ . Por tanto, los desplazamientos en cabeza y los esfuerzos arrojados por la ROM-05 serán menores que los arrojados por el CTE o la GCOC. En el **capítulo 6** se demostrará que los valores proporcionados por la ROM-05 son suficientemente seguros y, por lo tanto, los valores que proporcionen tanto el CTE como la GCOC también lo serán.

Nota: el valor utilizado para el esfuerzo cortante según la norma ROM-05 es el recogido en la ecuación (2.35).

4.2 Pilote enterrado en terreno homogéneo arcilloso

4.2.1 Influencia de la longitud del pilote para los métodos de cálculo de Broms y ROM-05

Los parámetros del terreno (**tabla 4.1**) y del pilote (**figuras 4.1 y 4.2**) se exponen a continuación.

Consistencia del terreno	Valor de C_u (kPa)	Diámetro del pilote (m)	Módulo k_H (kN/m ³)
Media	80	0.85	6305.88

Tabla 4.1. Parámetros del terreno y del módulo k_H (Broms) a partir de la ecuación (2.7).

En una hoja Excel se ha programado el cálculo del momento de inercia I_P del pilote, así como la longitud, diámetro, material del pilote, condición de contorno en la cabeza y otros parámetros necesarios para poder calcular tanto los desplazamientos como esfuerzos según el método analítico de Broms y el método normativo siguiendo la formulación de la ROM-05. Estos parámetros son los que aparecen en las ecuaciones (2.12)-(2.19)-(2.20)-(2.21)-(2.24)-(2.31).

Se muestra en las **figuras 4.1 y 4.2** las características del pilote de HA para longitudes del fuste igual a 15m – 20m – 25m – 30m según el método de Broms (**figura 4.1**) y según el método de la ROM-05 (**figura 4.2**).

En las **figuras 4.3 a 4.6** se muestran los resultados obtenidos de aplicar una fuerza lateral de 400kN y un momento flector de 200kNm en la cabeza del pilote según el método de Broms y de la ROM-05.

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Coeficiente β	0.201	1/m
Relación βL	3.018	
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m

(a)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	20	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Coeficiente β	0.201	1/m
Relación βL	4.023	
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m

(b)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Coeficiente β	0.201	1/m
Relación βL	5.029	
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m

(c)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	30	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Coeficiente β	0.201	1/m
Relación βL	6.035	
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m

(d)

Figuras 4.1. Características del pilote para L= 15m – 20m – 25m – 30m (Broms)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	15.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica T (ROM-05)	3.180	m
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m
Momento total (M)	1640.546	kN*m
Longitud varilla equivalente L* (ROM-05)	2.7581	m
Rigidez horizontal Kh (ROM-05)	25191.834	kN/m
Rigidez al giro Kθ (ROM-05)	154362.253	kN*m

(a)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	20	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	20.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica T (ROM-05)	3.180	m
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m
Momento total (M)	1579.875	kN*m
Longitud varilla equivalente L* (ROM-05)	2.6209	m
Rigidez horizontal Kh (ROM-05)	25440.361	kN/m
Rigidez al giro Kθ (ROM-05)	154362.253	kN*m

(b)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	25.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica T (ROM-05)	3.180	m
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m
Momento total (M)	1532.815	kN*m
Longitud varilla equivalente L* (ROM-05)	2.5440	m
Rigidez horizontal Kh (ROM-05)	25440.361	kN/m
Rigidez al giro Kθ (ROM-05)	154362.253	kN*m

(c)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	30	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	30.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica T (ROM-05)	3.180	m
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m
Momento total (M)	1524.772	kN*m
Longitud varilla equivalente L* (ROM-05)	2.5440	m
Rigidez horizontal Kh (ROM-05)	25440.361	kN/m
Rigidez al giro Kθ (ROM-05)	154362.253	kN*m

(d)

Figuras 4.2. Características del pilote para $L=15\text{m} - 20\text{m} - 25\text{m} - 30\text{m}$ (ROM-05)

Método normativo y analítico (Broms). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Desplazamiento lateral (Broms y ROM-05)

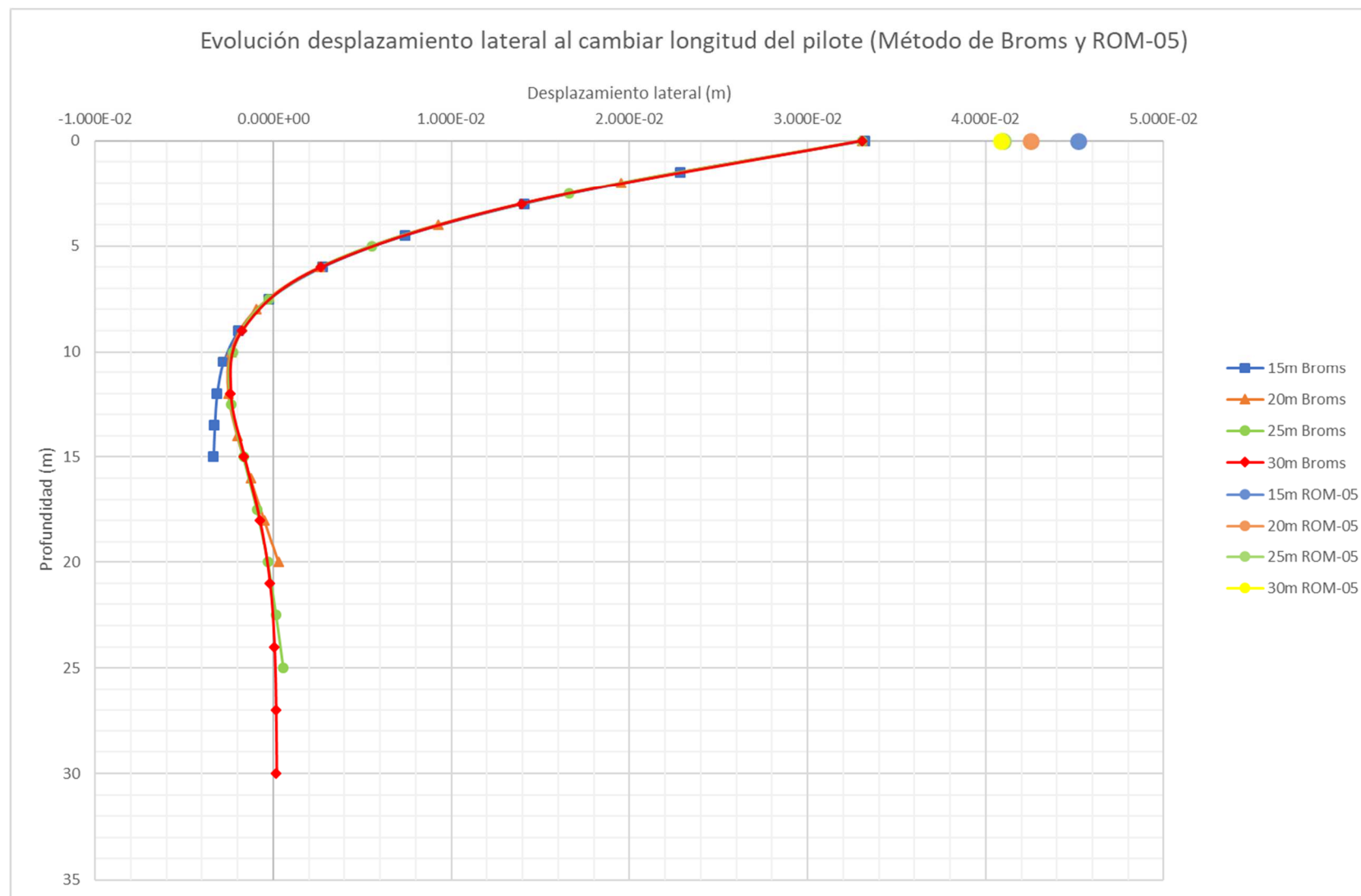


Figura 4.3. Evolución desplazamiento lateral al cambiar longitud del pilote (Broms y ROM-05)

Método normativo y analítico (Broms). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Giro (Broms y ROM-05)

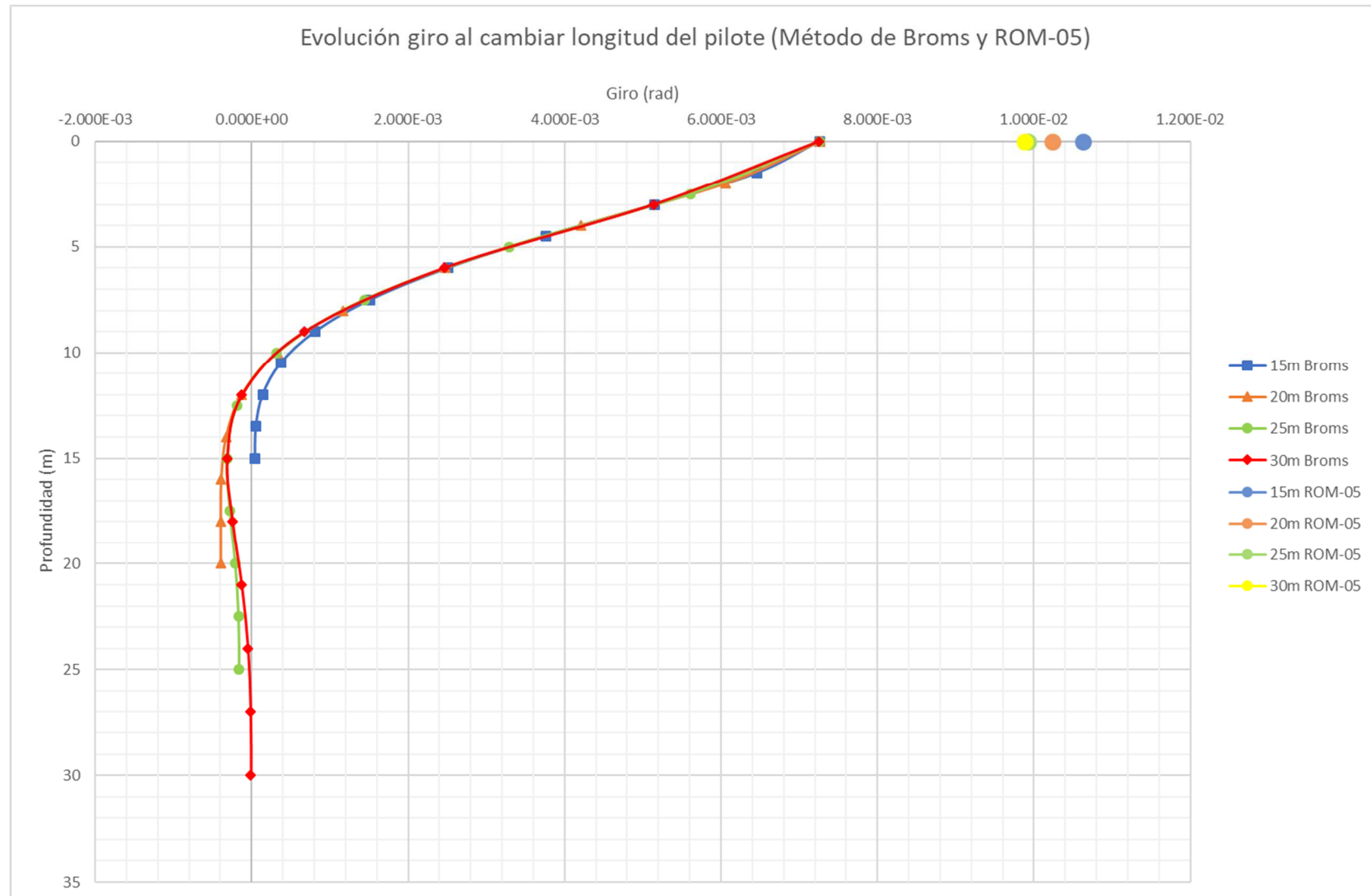


Figura 4.4. Evolución giro al cambiar longitud del pilote (Broms y ROM-05)

Momento flector (Broms y ROM-05)

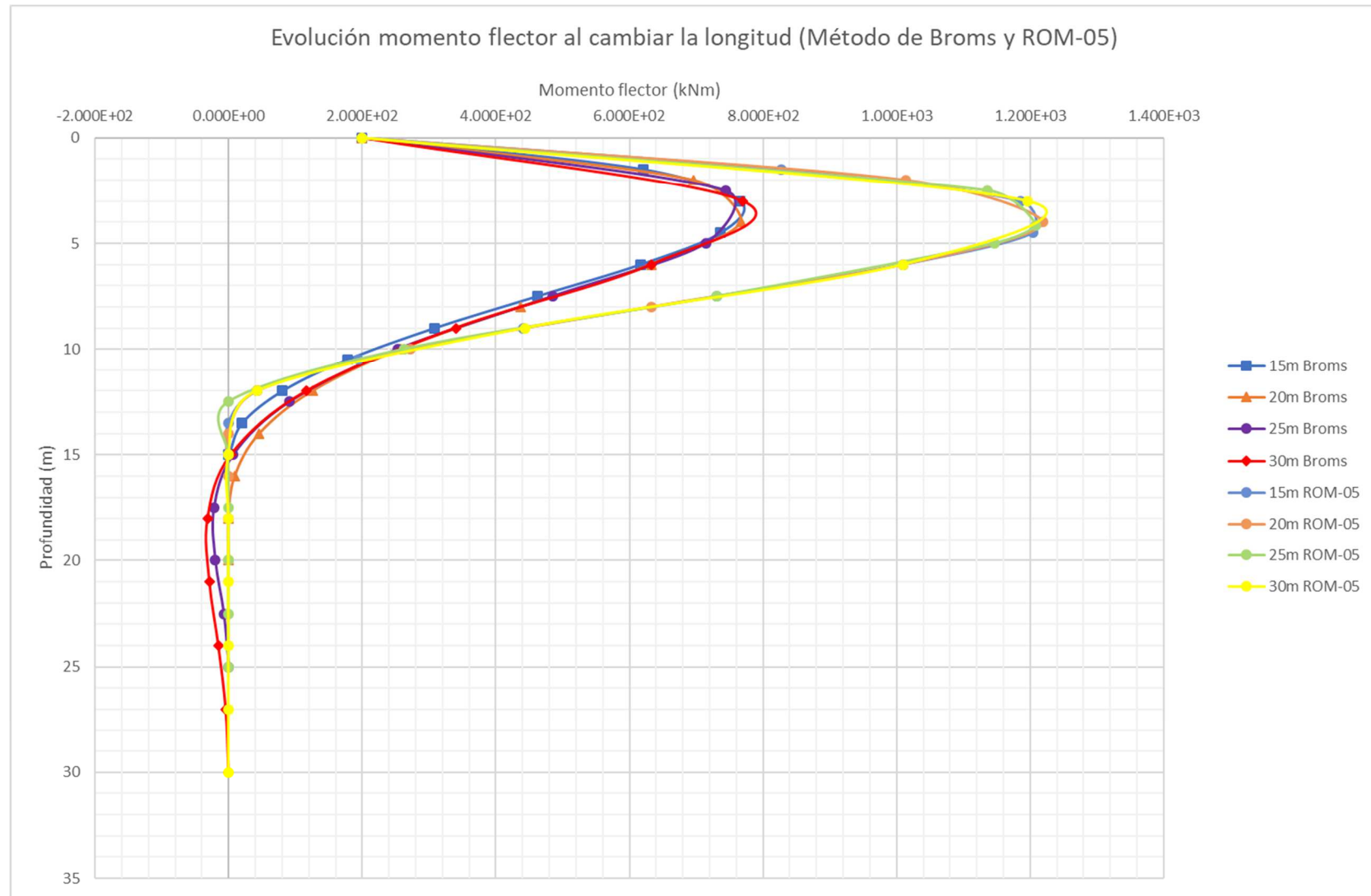


Figura 4.5. Evolución momento flector al cambiar longitud del pilote (Broms y ROM-05)

Esfuerzo cortante (Broms y ROM-05)

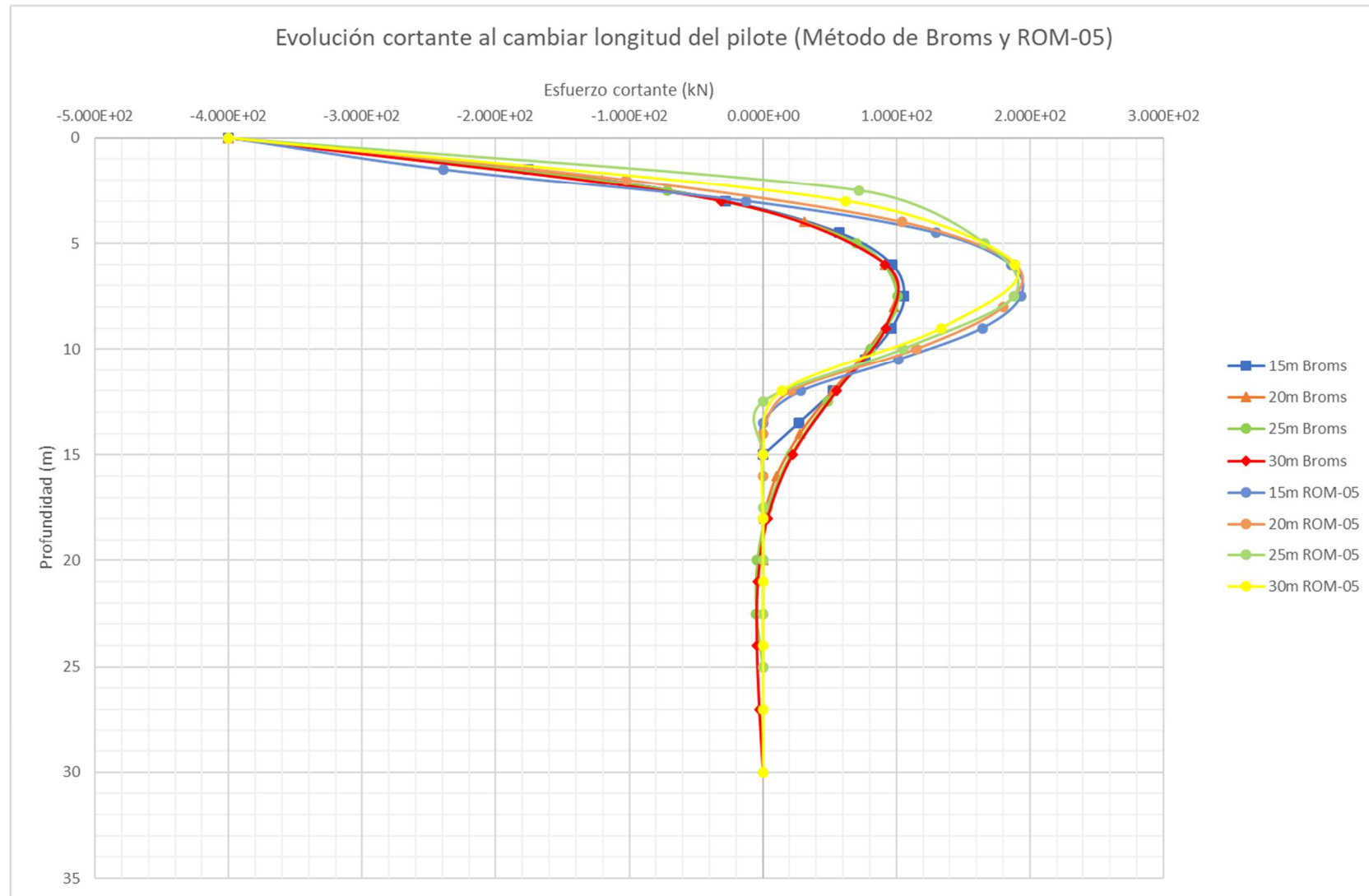


Figura 4.6. Evolución esfuerzo cortante al cambiar longitud del pilote (Broms y ROM-05 con criterio del CTE)

Comentarios

A partir de las **figuras 4.3 a 4.6** y para los métodos de Broms y normativo en terrenos arcillosos, se pueden hacer los siguientes comentarios respecto al cambio de la longitud del pilote:

- **Desplazamiento lateral (Broms):** Se observa de la figura 4.3 que, a medida que la longitud del pilote aumenta, se reducen los desplazamientos. Éstos son máximos en cabeza y mínimos o nulos a profundidades del entorno de los 20m. En cabeza y hasta los 8m de profundidad, la longitud del pilote no afecta al comportamiento del mismo. El desplazamiento de la cabeza del pilote para el caso de tener una longitud de 15m es ligeramente superior al experimentado por un pilote de 30m de largo. La diferencia entre estos dos casos es menor al milímetro, algo prácticamente inapreciable.
- **Desplazamiento lateral (ROM-05):** En el método normativo, la longitud sí tiene una mayor influencia en el cálculo de los desplazamientos laterales: a menor longitud del pilote, mayores desplazamientos. La diferencia entre el desplazamiento del pilote de 15m y el de 30m es de más de 4mm para la ROM-05. También se observa que aumentar la longitud del pilote más de 25m es innecesario si se busca un desplazamiento menor: los desplazamientos experimentados por el pilote de 25m de longitud y el de 30m son los mismos.
- **Giros:** Se observa en la **figura 4.4** que con los giros ocurre algo similar que con los desplazamientos: el aumento de la longitud del pilote no provoca un decrecimiento considerable del giro. Para el método normativo, se observa nuevamente que aumentar el pilote más de 25m es innecesario si se busca un giro menor.
- **Momentos flectores:** Se observa en la **figura 4.5** que la norma ROM-05 presenta una envolvente con valores mayores que Broms para profundidades menores a los 10m. El máximo momento flector se mueve entre los 3m-4m de profundidad. En sendos métodos (Broms y ROM-05), los momentos flectores tienden a anularse para profundidades mayores a los 15m.
- **Esfuerzo cortante:** Se puede ver en la **figura 4.6** que la longitud influye muy levemente a la envolvente de los cortantes para sendos métodos y que, éstos, tienden a anularse con la profundidad. Centrándonos en los valores positivos del esfuerzo cortante, en sendos modelos se alcanza un valor máximo que tiende a ser constante, aunque aumente la longitud del pilote. Este valor es mayor para el método normativo que para el método analítico o de Broms (ROM-05 con criterio del CTE > Broms).

Resumen diferencias entre los métodos: El método de Broms arroja menores desplazamientos en cabeza que el método normativo para una misma longitud del pilote. Sin embargo, existen tramos en los esfuerzos donde el método de Broms proporciona valores superiores para una misma profundidad y viceversa. En cuanto a los valores máximos, tanto de momento flector como de cortante, es el método normativo el que proporciona valores máximos superiores.

Podemos concluir, por tanto, que en terrenos arcillosos la influencia de la longitud es nimia tanto para el método de Broms como para el método normativo en el cálculo de desplazamientos y esfuerzos cuando un pilote está sometido a una carga lateral y un momento en cabeza.

4.2.2 Influencia del diámetro del pilote para los métodos de cálculo de Broms y ROM-05

Los parámetros del terreno (**tabla 4.2**) y del pilote (**figuras 4.7 y 4.8**) se exponen a continuación.

Consistencia del terreno	Valor de C_u (kPa)	Diámetro del pilote (m)	Módulo k_H (kN/m ³)
Media	80	0.85	6305.88
		1.00	5360.00
		1.25	4288.00
		1.50	3573.33

Tabla 4.2. Valores del módulo k_H (Broms) según diámetro del pilote a partir de la ecuación (2.7).

En una hoja Excel se ha programado el cálculo del momento de inercia I_P del pilote, así como la longitud, diámetro, material del pilote, condición de contorno en la cabeza y otros parámetros necesarios para poder calcular tanto los desplazamientos como esfuerzos según el método analítico de Broms y el método normativo siguiendo la formulación de la ROM-05. Estos parámetros son los que aparecen en las ecuaciones (2.12)-(2.19)-(2.20)-(2.21)-(2.24)-(2.31).

Se muestra en las **figuras 4.7 y 4.8** las características del pilote de HA para diámetros del pilote igual a 0.85m–1.00m–1.25m–1.50m según el método de Broms (**figura 4.7**) y según el método de la ROM-05 (**figura 4.8**).

En las **figuras 4.9 a 4.12** se muestran los resultados obtenidos de aplicar una fuerza lateral de 400kN y un momento flector de 200kNm en la cabeza del pilote según el método de Broms y de la ROM-05.

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Coefficiente β	0.201	1/m
Relación βL	5.029	
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m

(a)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	1.00	m
Diámetro equivalente	1.00	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0491	m ⁴
Coefficiente β	0.171	1/m
Relación βL	4.275	
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m

(b)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	1.25	m
Diámetro equivalente	1.25	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.1198	m ⁴
Coefficiente β	0.137	1/m
Relación βL	3.420	
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m

(c)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	1.50	m
Diámetro equivalente	1.50	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.2485	m ⁴
Coefficiente β	0.114	1/m
Relación βL	2.850	
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m

(d)

Figuras 4.7. Características del pilote para $d = 0.85\text{m} - 1.00\text{m} - 1.25\text{m} - 1.50\text{m}$ (Broms)

Método normativo y analítico (Broms). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	25.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica T (ROM-05)	3.180	m
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m
Momento total (M)	1532.815	kN*m
Longitud varilla equivalente L* (ROM-05)	2.5440	m
Rigidez horizontal Kh (ROM-05)	25440.361	kN/m
Rigidez al giro Kθ (ROM-05)	154362.253	kN*m

(a)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	1.00	m
Diámetro equivalente	1.00	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	25.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0491	m ⁴
Longitud elástica T (ROM-05)	3.741	m
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m
Momento total (M)	1773.047	kN*m
Longitud varilla equivalente L* (ROM-05)	3.0494	m
Rigidez horizontal Kh (ROM-05)	29929.837	kN/m
Rigidez al giro Kθ (ROM-05)	251353.150	kN*m

(b)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	1.25	m
Diámetro equivalente	1.25	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	25.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.1198	m ⁴
Longitud elástica T (ROM-05)	4.677	m
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m
Momento total (M)	2185.514	kN*m
Longitud varilla equivalente L* (ROM-05)	3.9683	m
Rigidez horizontal Kh (ROM-05)	37412.296	kN/m
Rigidez al giro Kθ (ROM-05)	490924.122	kN*m

(c)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	1.50	m
Diámetro equivalente	1.50	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	25.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.2485	m ⁴
Longitud elástica T (ROM-05)	5.612	m
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m
Momento total (M)	2610.471	kN*m
Longitud varilla equivalente L* (ROM-05)	4.9154	m
Rigidez horizontal Kh (ROM-05)	43942.954	kN/m
Rigidez al giro Kθ (ROM-05)	846619.225	kN*m

(d)

Figuras 4.8. Características del pilote para $d = 0.85\text{m} - 1.00\text{m} - 1.25\text{m} - 1.50\text{m}$ (ROM-05)

Desplazamiento lateral (Broms y ROM-05)

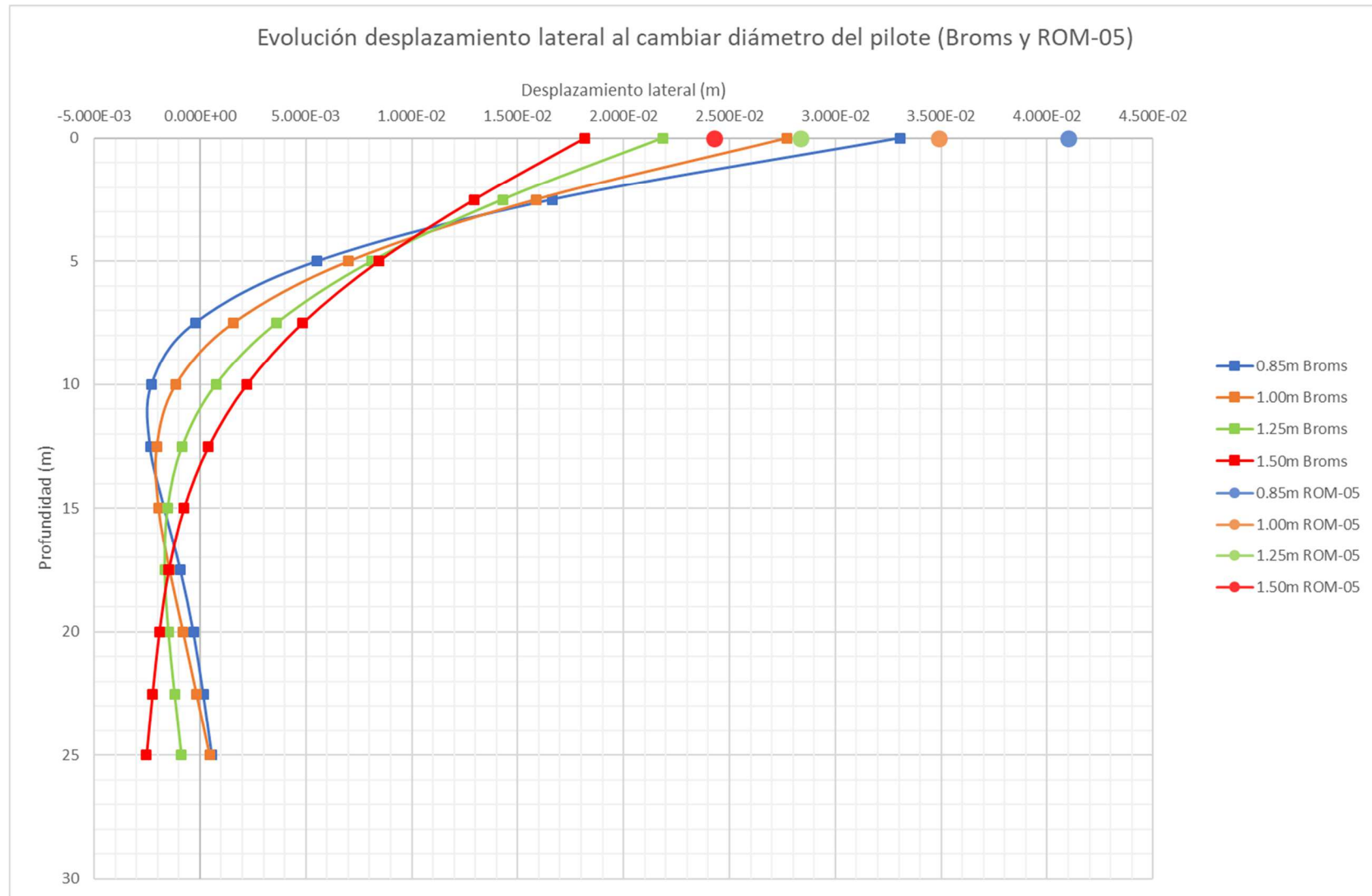


Figura 4.9. Evolución desplazamiento lateral al cambiar diámetro del pilote (Broms y ROM-05)

Método normativo y analítico (Broms). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Giro (Broms y ROM-05)

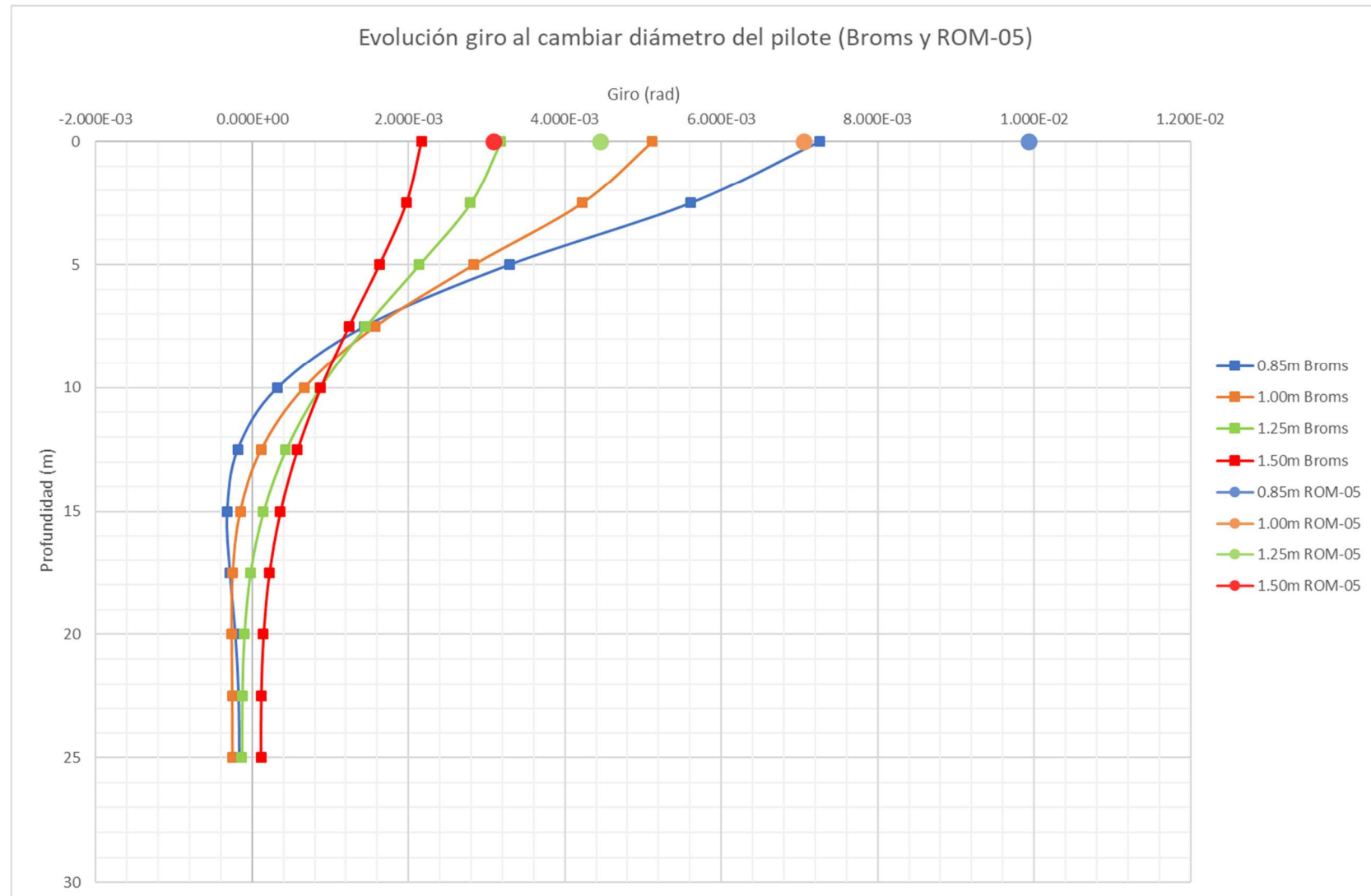


Figura 4.10. Evolución giro al cambiar diámetro del pilote (Broms y ROM-05)

Momento flector (Broms y ROM-05)

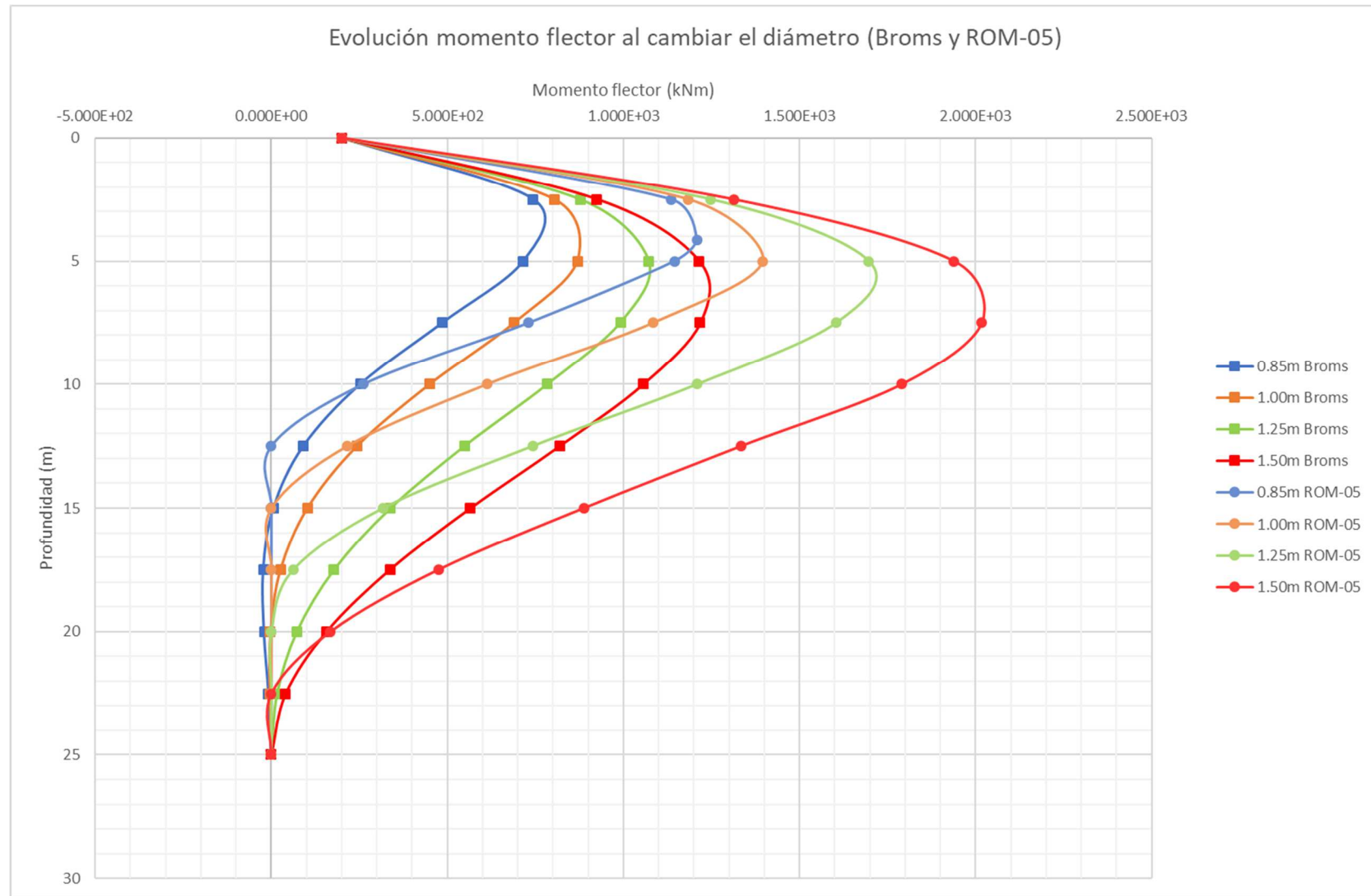


Figura 4.11. Evolución momento flector al cambiar diámetro del pilote (Broms y ROM-05)

Esfuerzo cortante (Broms y ROM-05)

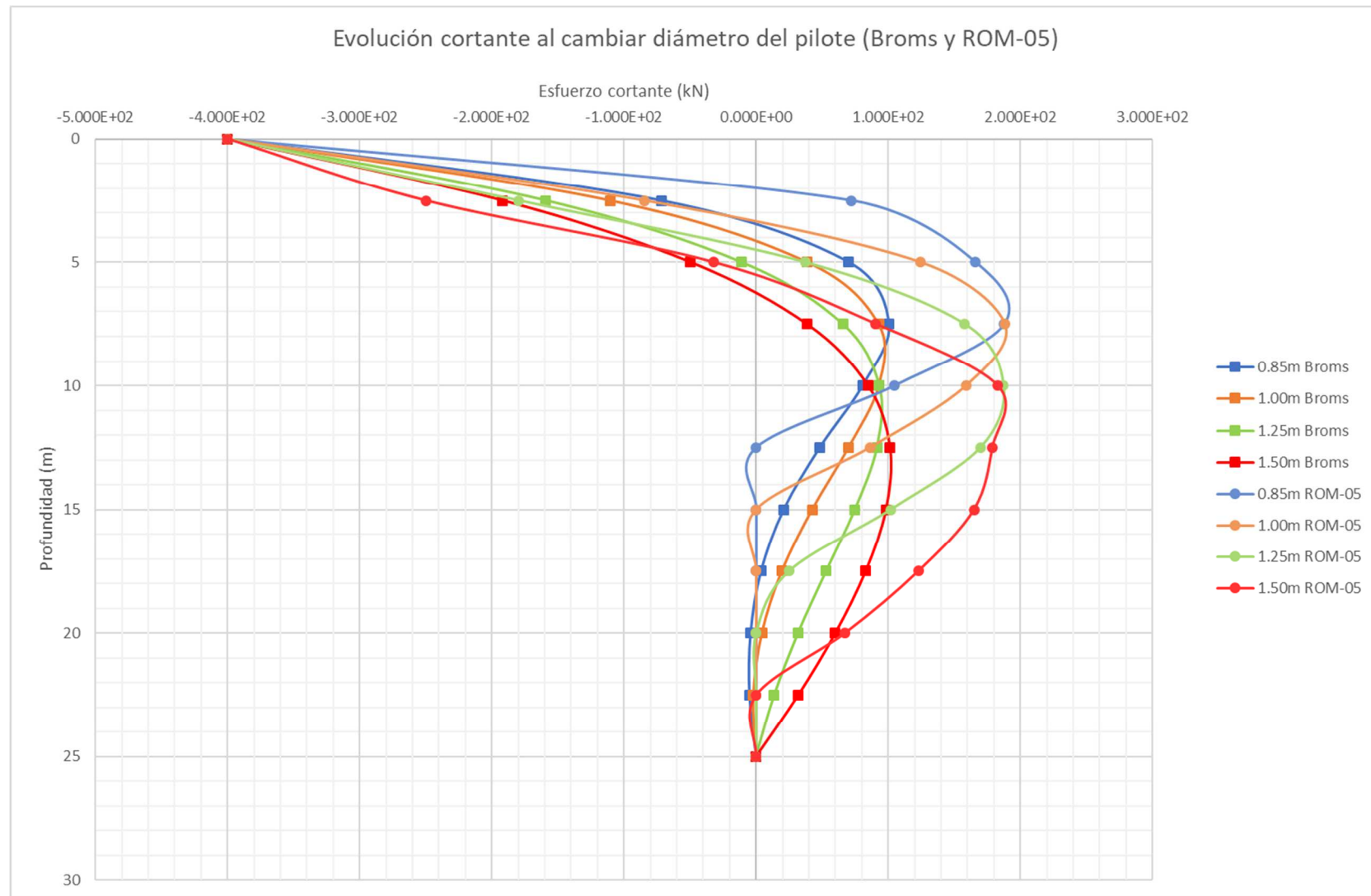


Figura 4.12. Evolución esfuerzo cortante al cambiar diámetro del pilote (Broms y ROM-05 con criterio del CTE)

Comentarios

Para el método de Broms y los normativos en terrenos arcillosos, cambiar el diámetro del pilote sí tiene un mayor efecto en los resultados:

- **Desplazamiento:** En la **figura 4.9** se observa que, al disminuir el diámetro, los mayores desplazamientos en la cabeza del pilote corresponden al método normativo. En el método de Broms, para profundidades del entorno de los 10m, se aprecia un cambio en la dirección de los desplazamientos; disminuyendo éste al aumentar el diámetro del pilote. El desplazamiento de la cabeza del pilote para el caso de tener un diámetro de 0.85m es superior al experimentado por un pilote de 1.50m de diámetro en ambas metodologías. La diferencia entre estos dos casos es de, aproximadamente, 1.5cm en el caso del método de Broms y de 1.7cm en el caso normativo.
- **Giro:** los valores del giro en la cabeza del pilote descienden de manera considerable con el aumento del diámetro (v. **figura 4.10**). El pilote de 0.85m suele girar tres veces más que el pilote de 1.50m en cabeza. Esta tendencia se observa en sendas metodologías. Según el método de Broms, a lo largo del fuste, el giro tiende a disminuir de valor y a cambiar de signo a medida que aumenta la profundidad.
- **Momento flector:** Se puede ver en la **figura 4.11** que los mayores momentos son debidos al modelo normativo. El aumento del diámetro se traduce en un aumento del momento flector soportado: el pilote de 1.50m soporta un momento flector 1.5 veces mayor que el pilote de 0.85m. A su vez, este valor máximo se produce a mayor profundidad con el aumento del área del pilote. Se observa también que los momentos tienden a disminuir al aumentar la profundidad a partir de los 7m.
- **Esfuerzo cortante:** Se aprecia en la **figura 4.12** que los cortantes negativos en ambos métodos aumentan al aumentar el diámetro del pilote y disminuyen con la profundidad. Por otro lado, los cortantes positivos alcanzan un valor máximo, relativamente de valor constante, que se produce a mayor profundidad con el aumento del diámetro. En sendos métodos, el punto donde se alcanza el valor nulo se da, igualmente, a mayor profundidad en el pilote de 1.50m de diámetro.

Resumen diferencias entre los métodos: El método de Broms arroja menores desplazamientos en cabeza que el método normativo para un mismo diámetro. Sin embargo, existen tramos en los esfuerzos donde el método de Broms proporciona valores superiores para una misma profundidad y viceversa. En cuanto a los valores máximos, tanto de momento flector como de cortante, es el método normativo el que proporciona valores máximos superiores.

Podemos concluir, por tanto, que el diámetro sí es un parámetro determinante tanto para el método de Broms como para el método normativo en el cálculo de los desplazamientos y esfuerzos en un terreno arcilloso cuando un pilote está sometido a una carga lateral y un momento en la cabeza.

4.2.3 Influencia de la consistencia del terreno para los métodos de cálculo de Broms y ROM-05

Los parámetros del terreno (**tabla 4.3**) y del pilote (**figuras 4.13 y 4.14**) se exponen a continuación.

Consistencia del terreno	Valor de C_u (kPa)	Diámetro del pilote (m)	Módulo k_H (kN/m ³)
Blanda	40	0.85	3152.94
Media	80		6305.88
Firme	100		7882.35

Tabla 4.3. Parámetros del terreno y valores del módulo k_H (Broms) según consistencia del terreno a partir de la ecuación (2.7).

En una hoja Excel se ha programado el cálculo del momento de inercia I_p del pilote, así como la longitud, diámetro, material del pilote, condición de contorno en la cabeza y otros parámetros necesarios para poder calcular tanto los desplazamientos como esfuerzos según el método analítico de Broms y el método normativo siguiendo la formulación de la ROM-05. Estos parámetros son los que aparecen en las ecuaciones (2.12)-(2.19)-(2.20)-(2.21)-(2.24)-(2.31).

Se muestra en las **figuras 4.13 y 4.14** las características del pilote de HA en caso de estar enterrado en una arcilla blanda, media o firme según el método de Broms (**figura 4.13**) y según el método de la ROM-05 (**figura 4.14**).

En las **figuras 4.15 a 4.18** se muestran los resultados obtenidos de aplicar una fuerza lateral de 400kN y un momento flector de 200kNm en la cabeza del pilote según el método de Broms y de la ROM-05.

Parámetros del pilote (arcilla blanda)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Coefficiente β	0.169	1/m
Relación βL	4.229	
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m

(a)

Parámetros del pilote (arcilla media)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Coefficiente β	0.201	1/m
Relación βL	5.029	
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m

(b)

Parámetros del pilote (arcilla firme)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Coefficiente β	0.213	1/m
Relación βL	5.318	
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m

(c)

Figuras 4.13. Características del pilote para $C_u = 40 \text{ kPa} - 80 \text{ kPa} - 100 \text{ kPa}$ (Broms)

Método normativo y analítico (Broms). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Parámetros del pilote (arcilla blanda)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	25.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica T (ROM-05)	3.782	m
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m
Momento total (M)	1790.612	kN*m
Longitud varilla equivalente L* (ROM-05)	3.0885	m
Rigidez horizontal Kh (ROM-05)	15126.929	kN/m
Rigidez al giro Kθ (ROM-05)	129802.666	kN*m

(a)

Parámetros del pilote (arcilla media)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	25.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica T (ROM-05)	3.180	m
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m
Momento total (M)	1532.815	kN*m
Longitud varilla equivalente L* (ROM-05)	2.5440	m
Rigidez horizontal Kh (ROM-05)	25440.361	kN/m
Rigidez al giro Kθ (ROM-05)	154362.253	kN*m

(b)

Parámetros del pilote (arcilla firme)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	25.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica T (ROM-05)	3.008	m
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m
Momento total (M)	1463.744	kN*m
Longitud varilla equivalente L* (ROM-05)	2.4060	m
Rigidez horizontal Kh (ROM-05)	30075.010	kN/m
Rigidez al giro Kθ (ROM-05)	163218.211	kN*m

(c)

Figuras 4.14. Características del pilote para $C_u = 40 \text{ kPa} - 80 \text{ kPa} - 100 \text{ kPa}$ (ROM-05)

Desplazamiento lateral (Broms y ROM-05)

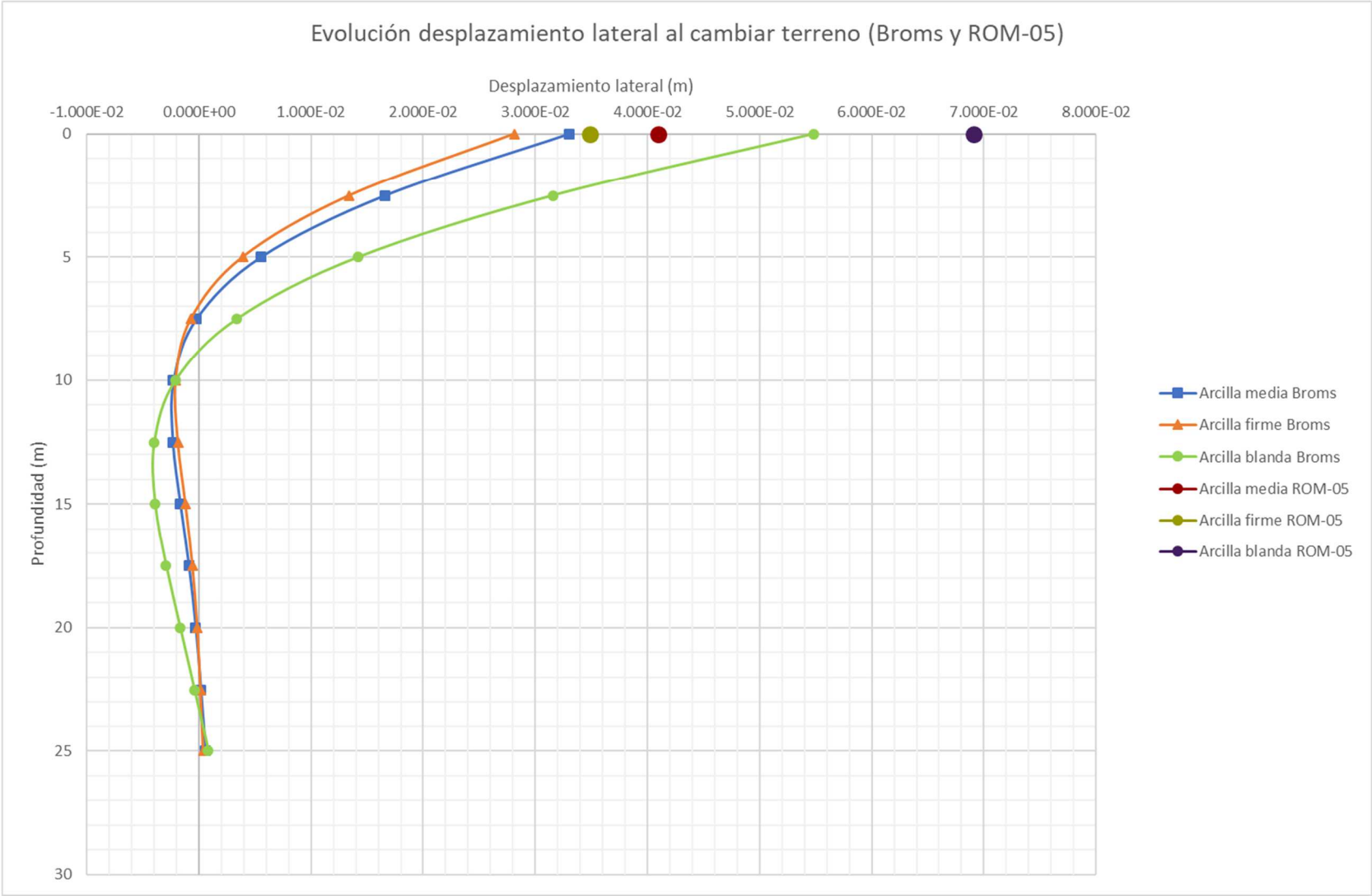


Figura 4.15. Evolución desplazamiento lateral al cambiar consistencia del terreno (Broms y ROM-05)

Método normativo y analítico (Broms). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Giro (Broms y ROM-05)

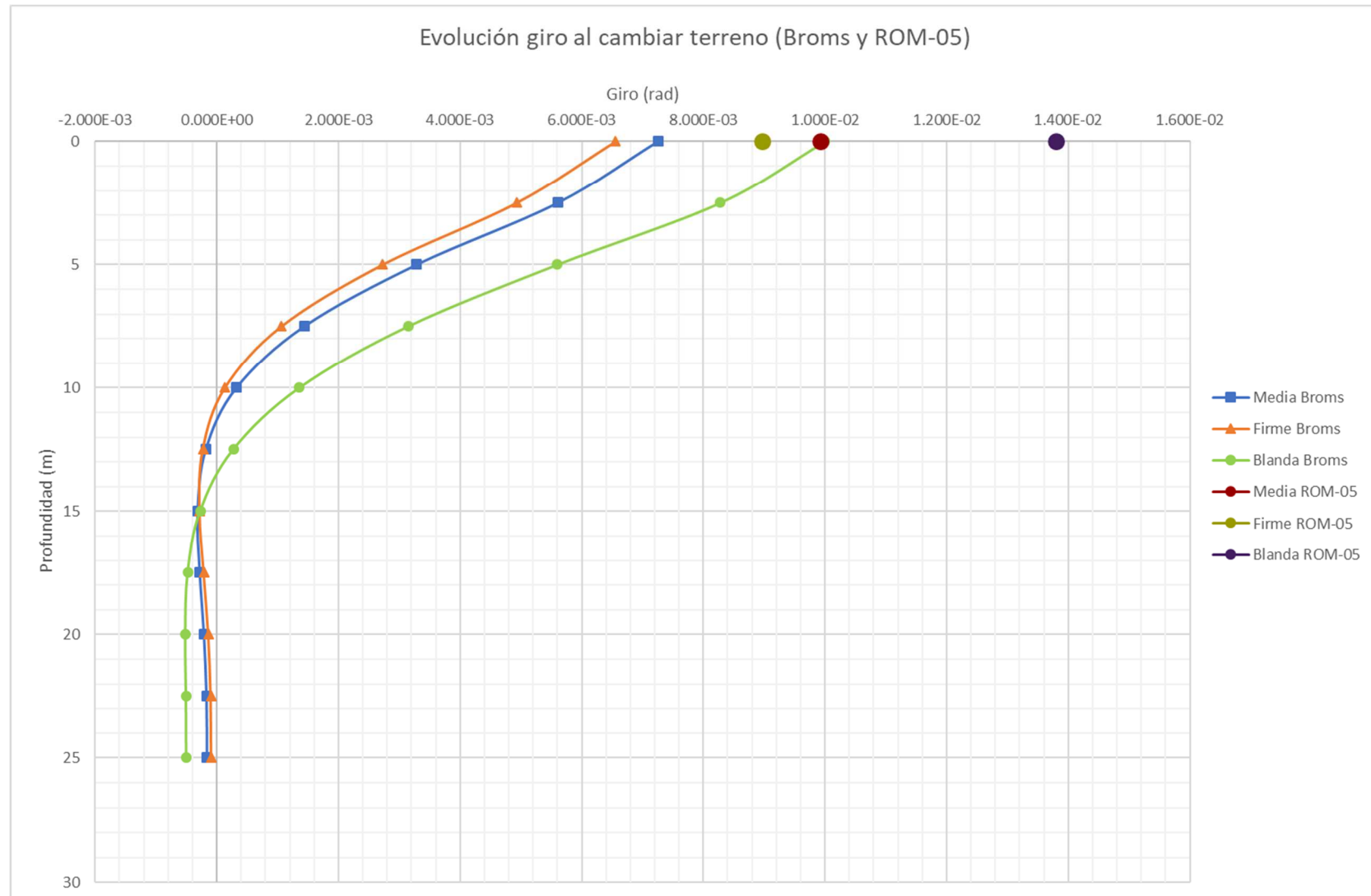


Figura 4.16. Evolución giro al cambiar consistencia del terreno (Broms y ROM-05)

Momento flector (Broms y ROM-05)

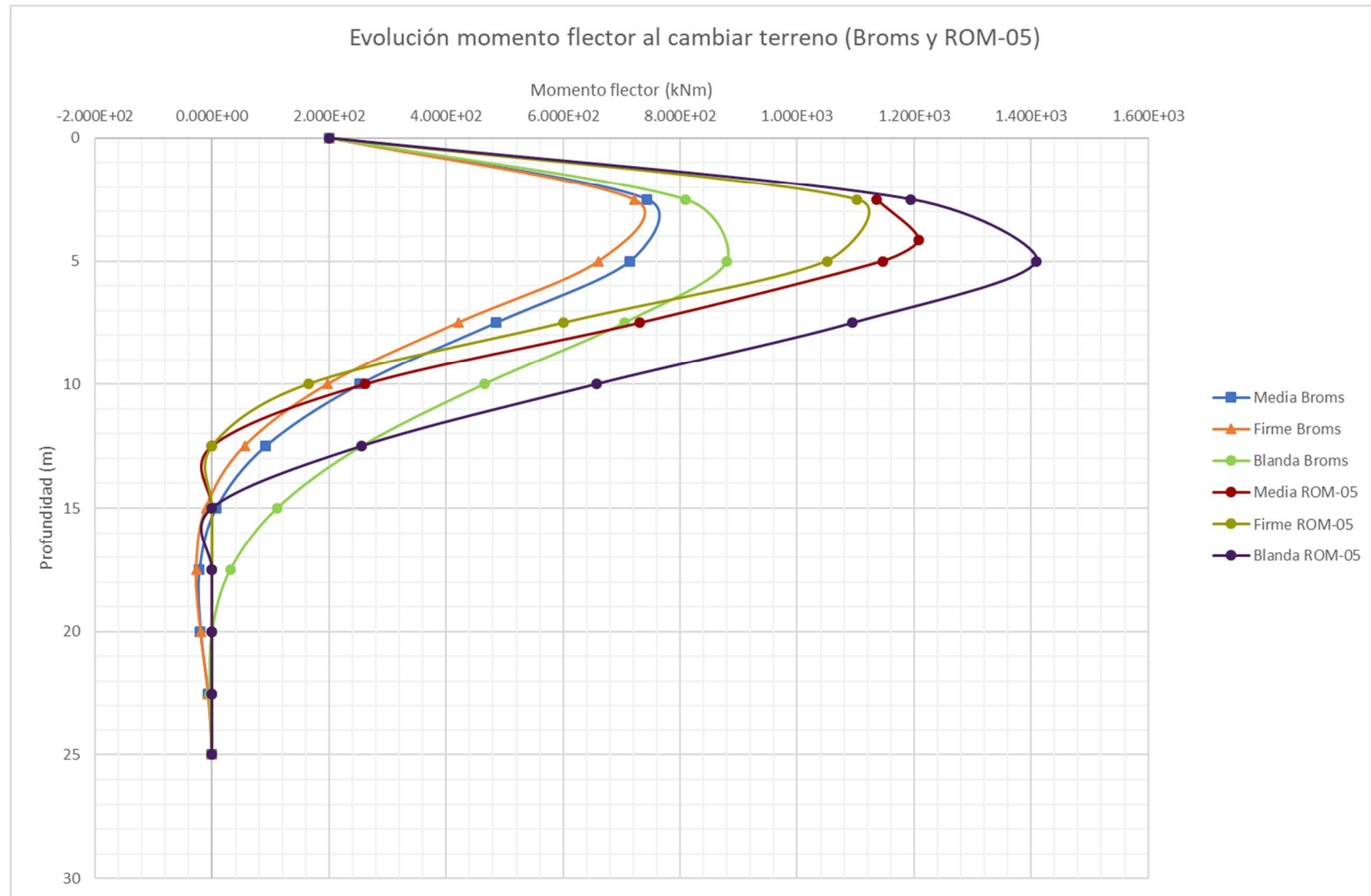


Figura 4.17. Evolución momento flector al cambiar consistencia del terreno (Broms y ROM-05)

Esfuerzo cortante (Broms y ROM-05)

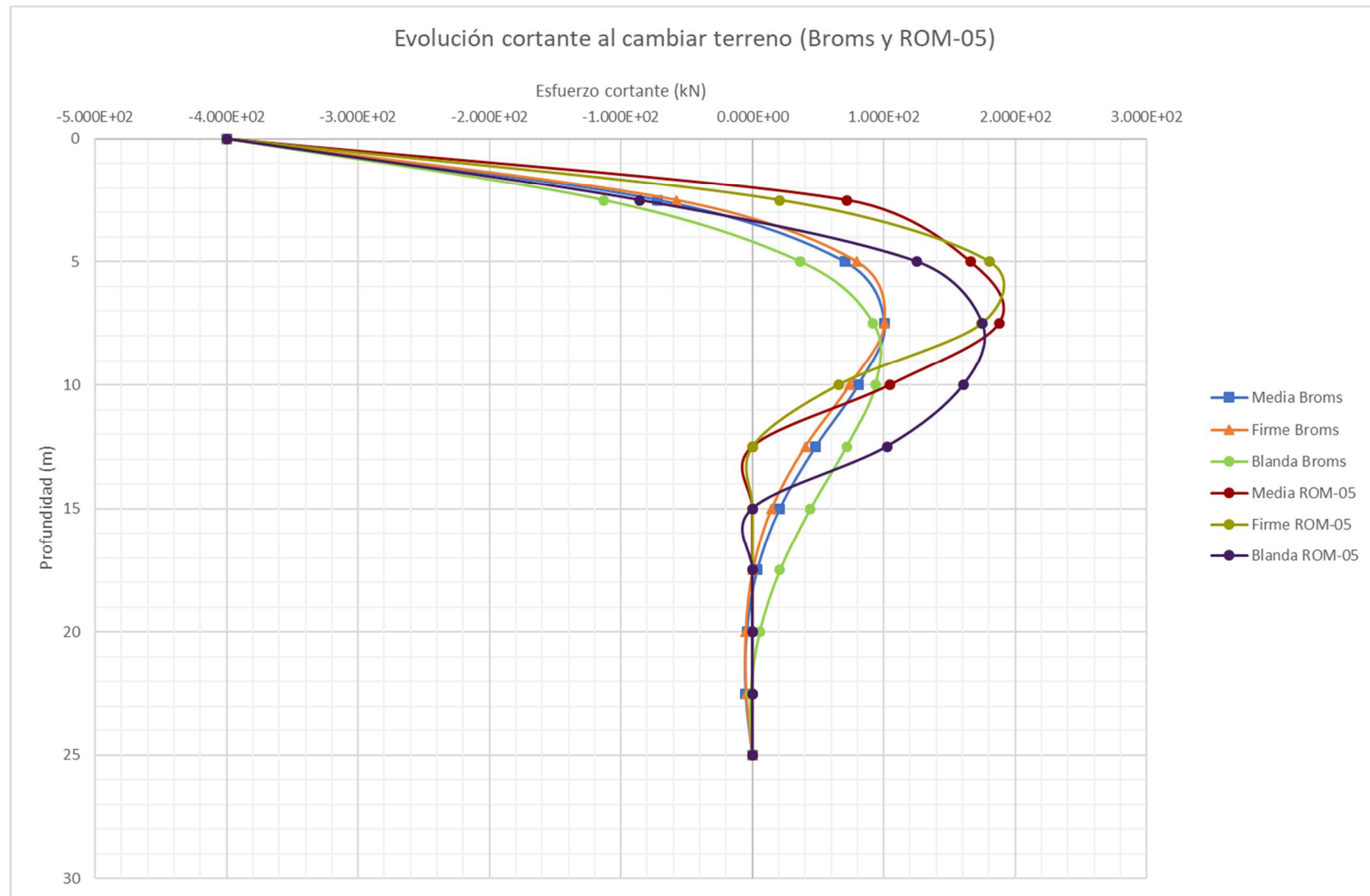


Figura 4.18. Evolución esfuerzo cortante al cambiar consistencia del terreno (Broms y ROM-05 con criterio del CTE)

Comentarios

Para el método de Broms y los normativos en terrenos arcillosos, cambiar la consistencia del terreno tiene un efecto considerable en los resultados:

- **Desplazamiento:** Según la **figura 4.15** y para arcilla blanda, el modelo normativo presenta los mayores desplazamientos en cabeza. El pilote se desplazará más en cabeza si lo enterramos en una arcilla blanda que si lo hacemos en una arcilla firme. La diferencia entre estos dos casos es de, aproximadamente, 2.6cm en el caso del método de Broms y de 3.5cm en el caso normativo; prácticamente el doble en ambos modelos. Para cualquier consistencia del terreno, ambos modelos tienden a reducir sus desplazamientos con el aumento de profundidad.
- **Giro:** los valores del giro en la cabeza del pilote también descienden con el aumento de la consistencia de la arcilla (v. **figura 4.16**). En arcilla blanda, el pilote gira 1.5 veces más que si estuviera en una arcilla firme. En el modelo de Broms, el giro tiende a disminuir con el aumento de la profundidad.
- **Momento flector:** En la **figura 4.17** se puede observar que los mayores momentos son debidos al modelo normativo y que, a cierta profundidad del terreno, estos esfuerzos tienden a anularse para cualquier consistencia del terreno. El aumento de la consistencia del terreno se traduce en un descenso del momento flector soportado: un pilote enterrado en una arcilla blanda soporta un momento flector mayor que en un terreno firme. ¿A qué se debe esto? En la interfaz terreno blando-pilote, la distribución de tensiones es casi uniforme y por tanto menor la curvatura. A menor curvatura, mayor serán los momentos en dichos puntos.
- **Esfuerzo cortante:** En la **figura 4.18** se puede observar que se repite el comportamiento de los apartados anteriores: a mejor terreno, menor esfuerzo cortante para una misma profundidad. Los cortantes negativos, en ambos métodos, aumentan al disminuir la consistencia del terreno y disminuyen con la profundidad. Por otro lado, los cortantes positivos alcanzan un valor máximo que se produce a mayor profundidad con el descenso de la consistencia de la arcilla. En ambos métodos, la profundidad donde se alcanza el valor nulo de dicho esfuerzo aumenta con el descenso de la consistencia de la arcilla. En otras palabras, en una arcilla blanda el esfuerzo cortante se hará nulo a una profundidad mayor que si estuviese el pilote enterrado en una arcilla firme.

Resumen diferencias entre los métodos: El método de Broms arroja menores desplazamientos en cabeza que el método normativo para una misma consistencia. Sin embargo, existen tramos en los esfuerzos donde el método de Broms proporciona valores superiores para una misma profundidad y viceversa. En cuanto a los valores máximos, tanto de momento flector como de cortante, es el método normativo el que proporciona valores máximos superiores. Otra diferencia es que el máximo cortante positivo es mayor en una arcilla firme que en una arcilla blanda para el método normativo, mientras que permanece constante para el método de Broms.

Podemos concluir, por tanto, que la consistencia del terreno es un parámetro determinante en sendos modelos de análisis para el cálculo de los desplazamientos y, en menor medida, para los esfuerzos cuando un pilote se encuentra sometido a una carga lateral y a un momento en cabeza.

Método normativo y analítico (Broms). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

4.2.4 Influencia del tipo de material del pilote para los métodos de cálculo de Broms y ROM-05

Los parámetros del terreno son los mismos que los recogidos en la **tabla 4.1.** y los del pilote se exponen a continuación (**figuras 4.19 y 4.20**).

En una hoja Excel se ha programado el cálculo del momento de inercia I_p del pilote, así como la longitud, diámetro, material del pilote, condición de contorno en la cabeza y otros parámetros necesarios para poder calcular tanto los desplazamientos como esfuerzos según el método analítico de Broms y el método normativo siguiendo la formulación de la ROM-05. Estos parámetros son los que aparecen en las ecuaciones (2.12)-(2.19)-(2.20)-(2.21)-(2.24)-(2.31).

Se muestra en las **figuras 4.19 y 4.20** las características del pilote según el material del que está hecho siguiendo el método de Broms (**figura 4.19**) y según el método de la ROM-05 (**figura 4.20**).

En las **figuras 4.21 a 4.24** se muestran los resultados obtenidos de aplicar una fuerza lateral de 400kN y un momento flector de 200kNm en la cabeza del pilote según el método de Broms y de la ROM-05.

Parámetros del pilote (HA-45)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Coefficiente β	0.201	1/m
Relación βL	5.029	
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m

(a)

Parámetros del pilote (Acero)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	a	
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	210.000	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Coefficiente β	0.126	1/m
Relación βL	3.141	
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m

(b)

Figuras 4.19. Características del pilote según material: HA-45 o acero (Broms)

Parámetros del pilote (HA-45)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	25.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica T (ROM-05)	3.180	m
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m
Momento total (M)	1532.815	kN*m
Longitud varilla equivalente L* (ROM-05)	2.5440	m
Rigidez horizontal Kh (ROM-05)	25440.361	kN/m
Rigidez al giro Kθ (ROM-05)	154362.253	kN*m

(a)

Parámetros del pilote (Acero)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	a	
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	25.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	210.000	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica T (ROM-05)	5.093	m
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m
Momento total (M)	2373.175	kN*m
Longitud varilla equivalente L* (ROM-05)	4.3865	m
Rigidez horizontal Kh (ROM-05)	40668.490	kN/m
Rigidez al giro Kθ (ROM-05)	633975.419	kN*m

(b)

Figuras 4.20. Características del pilote según material: HA-45 o acero (ROM-05)

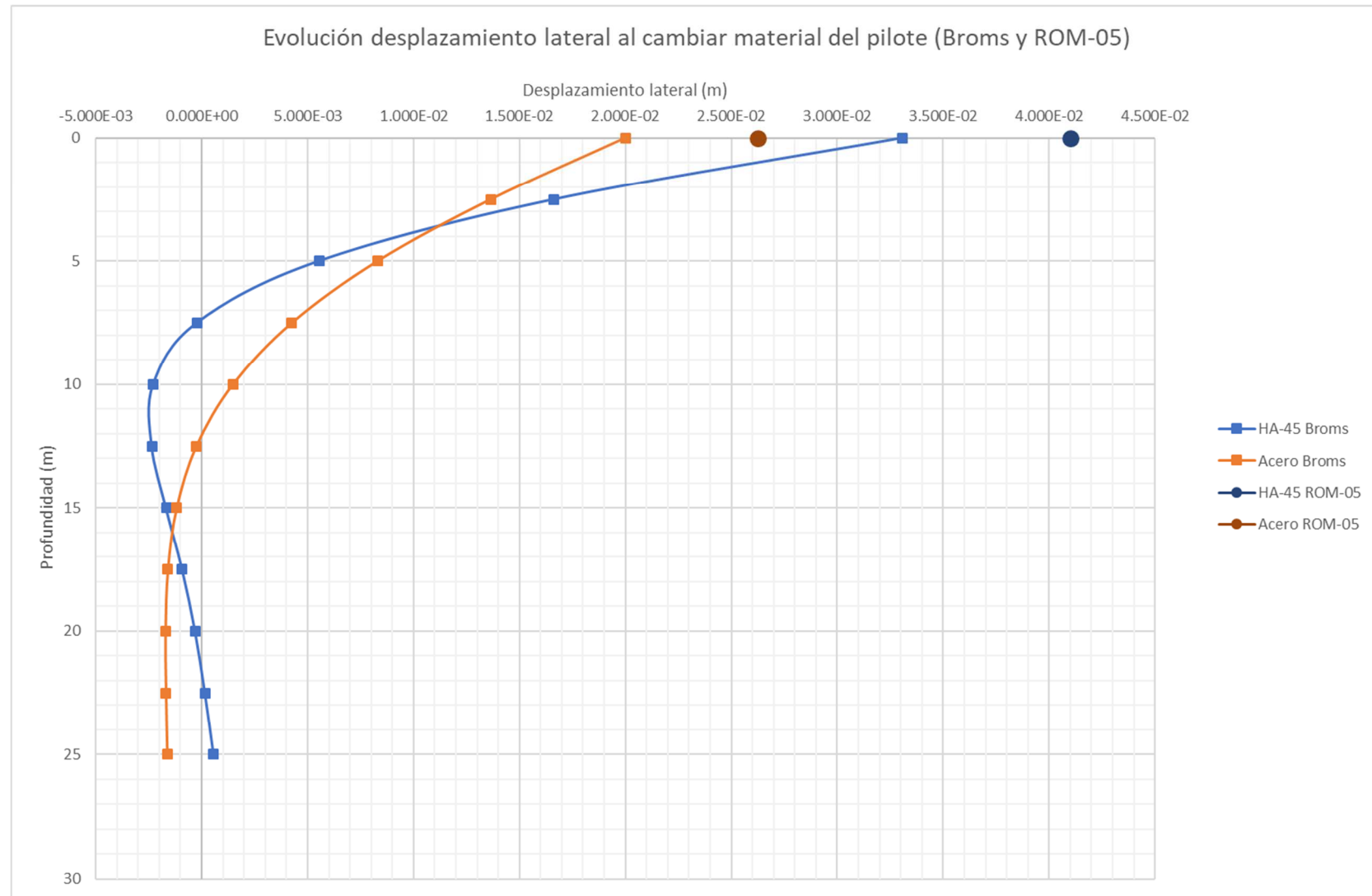
Desplazamiento lateral (Broms y ROM-05)

Figura 4.21. Evolución desplazamiento lateral al cambiar material del pilote (Broms y ROM-05)

Método normativo y analítico (Broms). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Giro (Broms y ROM-05)

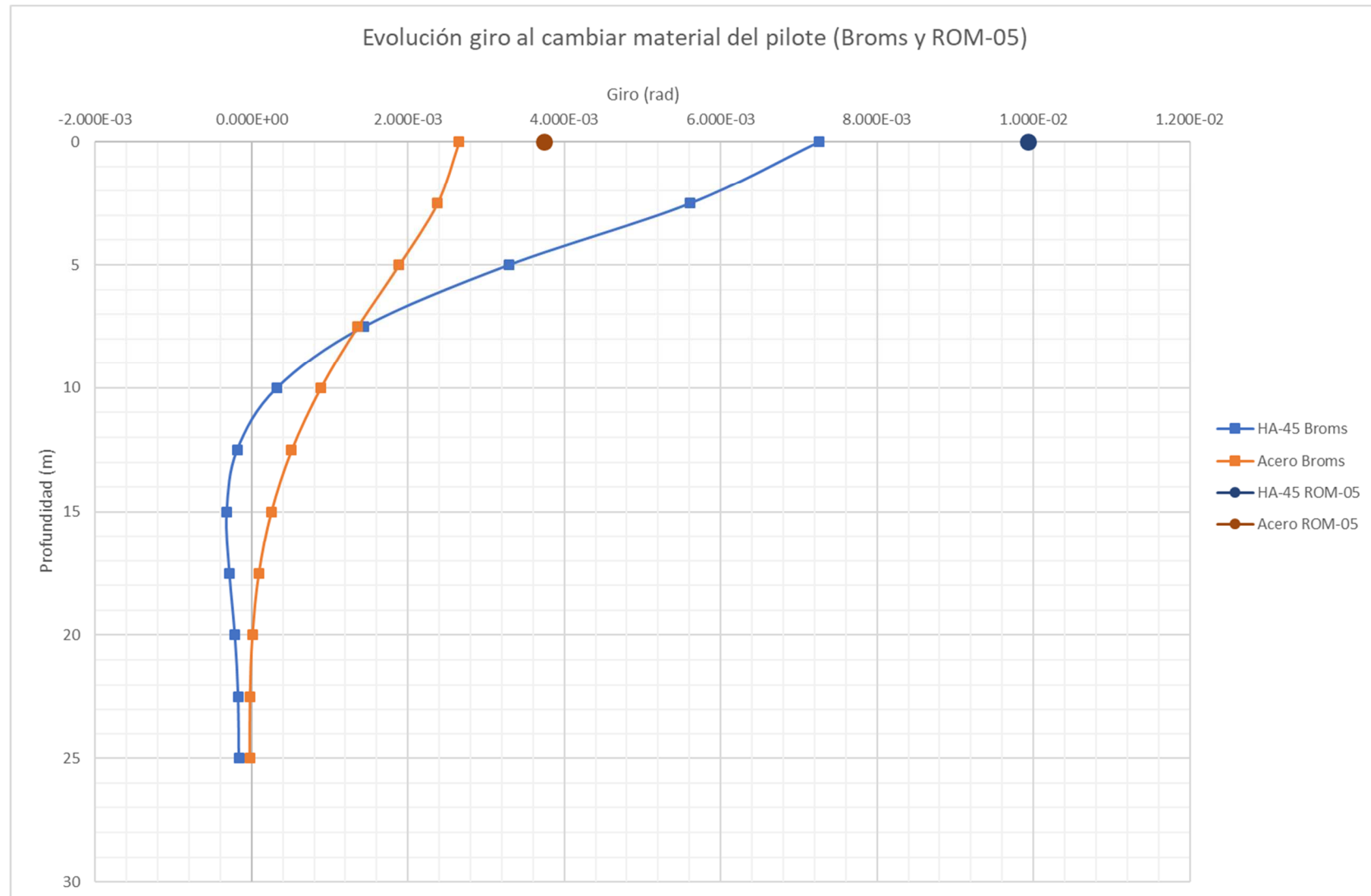


Figura 4.22. Evolución giro al cambiar material del pilote (Broms y ROM-05)

Momento flector (Broms y ROM-05)

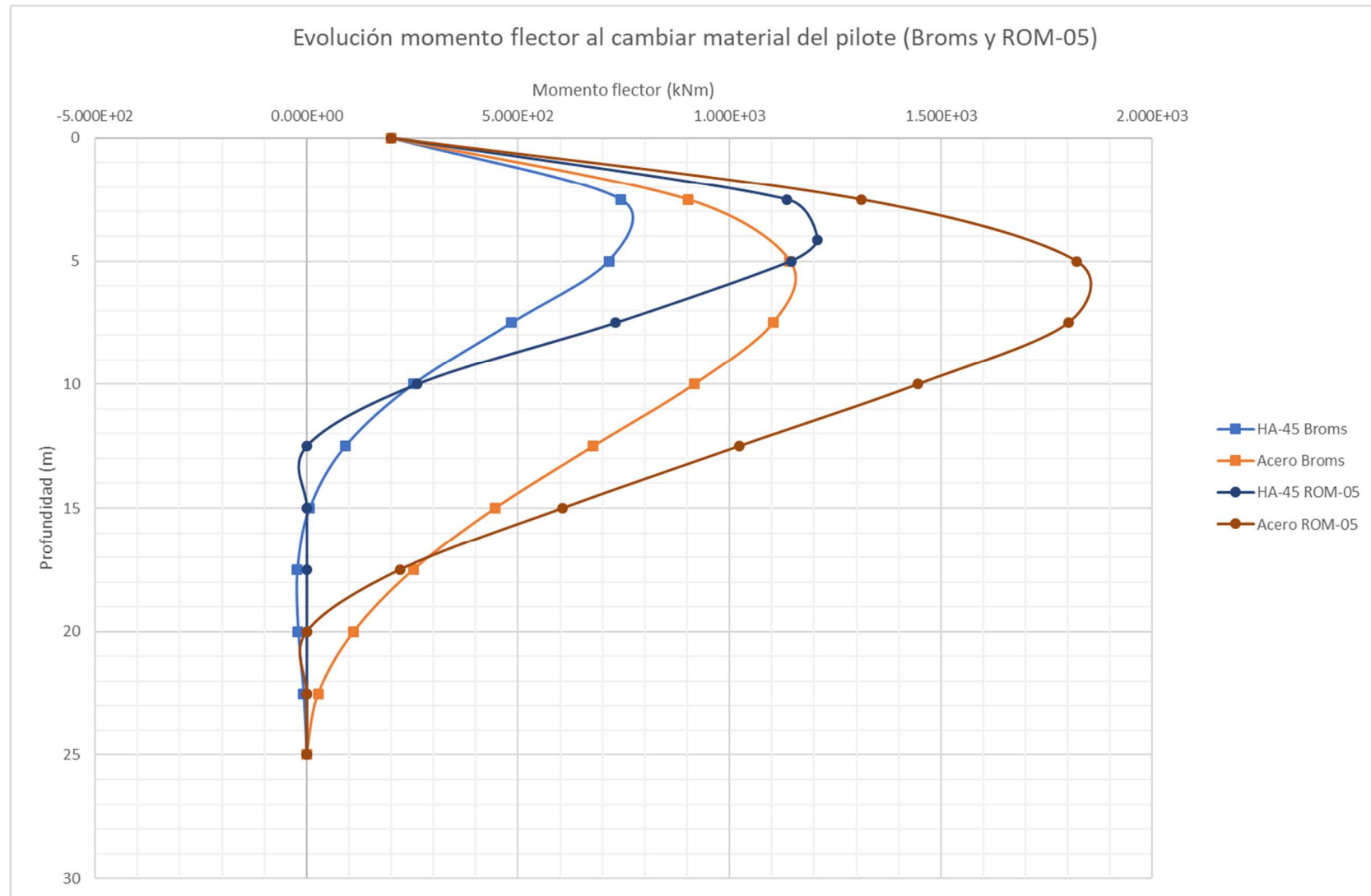


Figura 4.23. Evolución momento flector al cambiar material del pilote (Broms y ROM-05)

Método normativo y analítico (Broms). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Esfuerzo cortante (Broms y ROM-05)

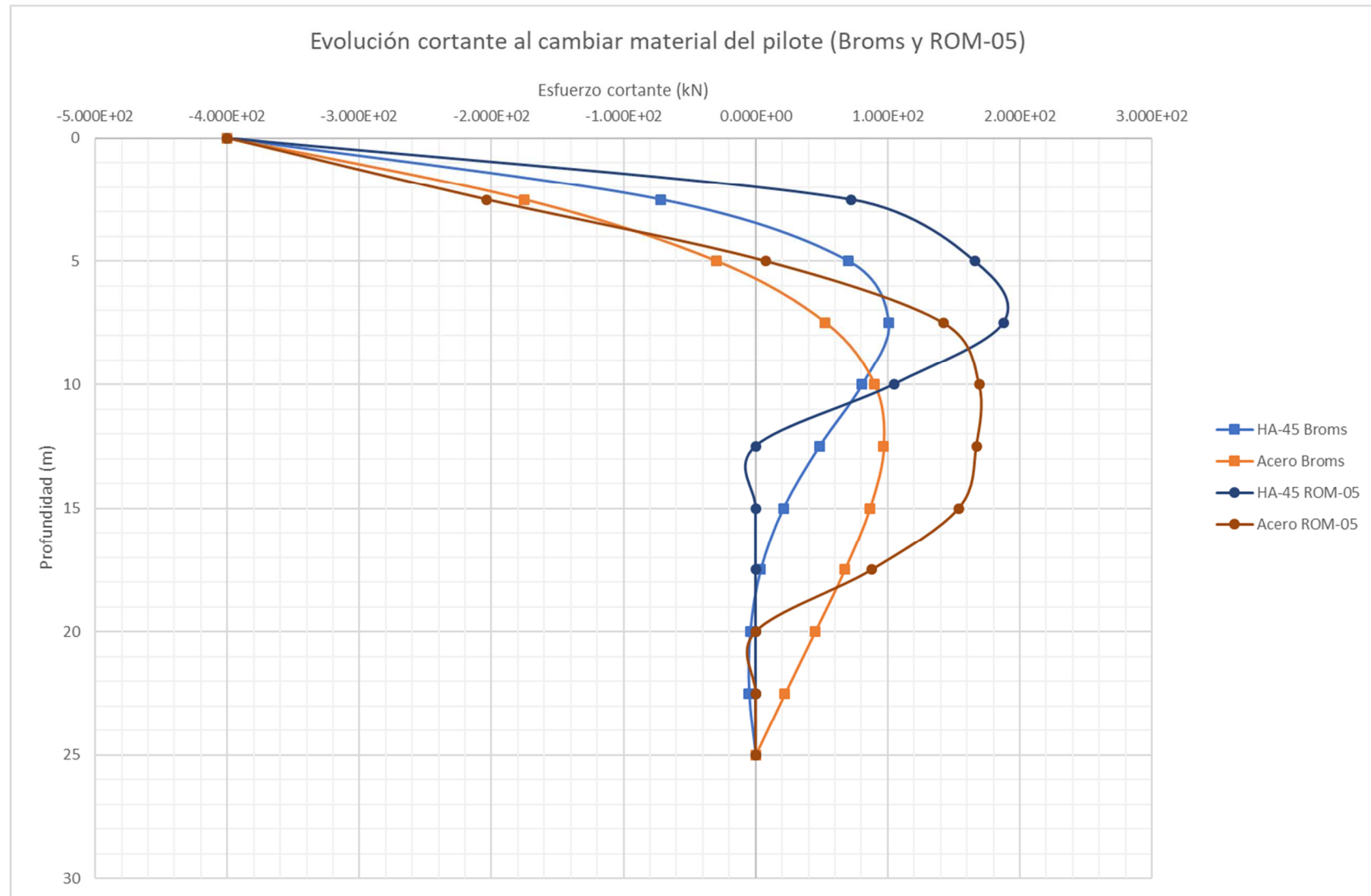


Figura 4.24. Evolución esfuerzo cortante al cambiar material del pilote (Broms y ROM-05 con criterio del CTE)

Comentarios

Para el método de Broms y los normativos en terrenos arcillosos, cambiar el tipo de pilote tiene un efecto muy destacado en los resultados:

- **Desplazamiento:** En cuanto a los modelos empleados, según la **figura 4.21** el mayor desplazamiento en cabeza es para el método normativo. El pilote se desplazará más en cabeza si es de hormigón que si es de acero. Esto se debe a que el pilote de HA es menos rígido que el de acero. Sin embargo, la diferencia entre los desplazamientos laterales en los dos tipos de pilote estudiados es menor que en el caso anterior (arcilla firme y arcilla blanda). La diferencia en el método de Broms es de, aproximadamente, 1.3cm y de 1.5cm en el caso normativo. Ambos tipos de pilote disminuyen sus desplazamientos laterales con el aumento de la profundidad en el terreno.
- **Giro:** Los mayores giros se observan, según la **figura 4.22**, con la ROM-05. La diferencia que se observa en la cabeza de los pilotes (acero y HA) es mayor en los giros que en los desplazamientos laterales. El pilote de hormigón, por ejemplo, gira 2.7 veces más que el pilote de acero en la cabeza. En el modelo de Broms, el giro tiende a disminuir con el aumento de la profundidad.
- **Momento flector:** Puede verse en la **figura 4.23** que, para ambos tipos de pilote, los máximos momentos se aprecian en el modelo normativo. Al pasar de un pilote a otro, en el modelo de Broms existe un incremento de 400 kNm como flector máximo; mientras que para la ROM-05 este incremento es de 600 kNm. Se puede decir que, para este esfuerzo, el material del pilote es un parámetro determinante, soportando un pilote de acero, aproximadamente, un momento flector 1.5 veces mayor. En profundidad se aprecia que los momentos flectores tienden a disminuir o anularse primero en los pilotes de HA y después en los de acero.
- **Esfuerzo cortante:** En la **figura 4.24** puede verse que, a mayor módulo del pilote E_p , mayor esfuerzo cortante para una misma profundidad. Se repite el comportamiento de los apartados anteriores: los cortantes negativos aumentan al aumentar el módulo del pilote E_p y disminuyen con la profundidad. Por otro lado, los cortantes positivos alcanzan un valor máximo que se produce a mayor profundidad con el aumento del módulo del pilote E_p . En ambos métodos, la profundidad donde se alcanza el valor nulo de dicho esfuerzo aumenta con el aumento del módulo del pilote E_p . En otras palabras, en un pilote de acero el esfuerzo cortante se hará nulo a una profundidad mayor que si fuese el pilote de HA.

Resumen diferencias entre los métodos: Se observa que el método de Broms arroja menores desplazamientos en cabeza y esfuerzos que el método normativo para un mismo tipo de material y a la misma profundidad. En cuanto a los valores máximos, tanto de momento flector como de cortante, es el método normativo el que proporciona valores máximos superiores para un mismo tipo de material. Otra diferencia es que el máximo cortante positivo es mayor en un pilote de HA que en uno de acero para el método normativo, mientras que permanece prácticamente constante para el método de Broms.

Podemos concluir, por tanto, que el tipo de material del pilote es un parámetro determinante en sendos modelos de análisis para el cálculo de los desplazamientos y más aún para el cálculo de los esfuerzos en arcillas cuando el pilote está sometido a una carga lateral y a un momento en la cabeza.

4.3 Pilote enterrado en terreno homogéneo arenoso

Tal y como se especifica en el apartado 2.3, el valor de T es el mismo para las tres normativas y para el método de Broms. Los valores del coeficiente de reacción n_H se adoptarán los propuestos por Terzaghi (1955) y recogidos en la **tabla 2.2**.

Ha de aclararse que la forma irregular de las curvas de los resultados para el método de Broms se debe a que los coeficientes F_{IJ} deben determinarse manualmente a partir de ábacos. También se aclara que el valor utilizado para el esfuerzo cortante según método normativo es el recogido en la ecuación (2.35).

4.3.1 Influencia de la longitud del pilote para los métodos de cálculo de Broms y Normativas

Los parámetros del terreno (**tabla 4.4**) y del pilote (**figuras 4.25 y 4.26**) se exponen a continuación según el método de cálculo.

Compacidad del terreno	Peso específico aparente γ [kN/m ³]	Peso específico saturado γ_{SAT} [kN/m ³]	Ángulo de rozamiento interno ϕ (°)	N_{SPT}	Coeficiente A	Coeficiente de reacción n_H (kN/m ³)
Media	20	23	35	26	860	12740.74

Tabla 4.4. Parámetros terreno granular para arena media a partir de la ecuación (2.13).

En una hoja Excel se ha programado el cálculo del momento de inercia I_P del pilote, así como la longitud, diámetro, material del pilote, condición de contorno en la cabeza y otros parámetros necesarios para poder calcular tanto los desplazamientos como esfuerzos según el método analítico de Broms y el método normativo. Estos parámetros son los que aparecen en las ecuaciones (2.12)-(2.19)-(2.20)-(2.21)-(2.24)-(2.31).

Se muestra en las **figuras 4.25 y 4.26** las características del pilote de HA para longitudes del fuste igual a 15m–20m–25m–30m según el método de Broms (**figura 4.25**) y según el método normativo (**figura 4.26**).

En las **figuras 4.27 a 4.30** se muestran los resultados obtenidos de aplicar una fuerza lateral de 400kN y un momento flector de 200kNm en la cabeza del pilote según el método de Broms y de las normativas.

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.299	m
Relación L/T	6.525	
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m

(a)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	20	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.299	m
Relación L/T	8.700	
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m

(b)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.299	m
Relación L/T	10.875	
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m

(c)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	30	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.299	m
Relación L/T	13.050	
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m

(d)

Figuras 4.25. Características del pilote para L= 15m – 20m – 25m – 30m (Broms)

Método normativo y analítico (Broms). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	15.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.299	m
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m
Momento total (M)	1152.816	kN*m
Longitud varilla equivalente (L*)	1.8820	m
Rigidez horizontal Kh	67335.807	kN/m
Rigidez al giro Kθ	213524.988	kN*m

(a)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	20	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	20.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.299	m
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m
Momento total (M)	1135.658	kN*m
Longitud varilla equivalente (L*)	1.8391	m
Rigidez horizontal Kh	67335.807	kN/m
Rigidez al giro Kθ	213524.988	kN*m

(b)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	25.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.299	m
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m
Momento total (M)	1135.658	kN*m
Longitud varilla equivalente (L*)	1.8391	m
Rigidez horizontal Kh	67335.807	kN/m
Rigidez al giro Kθ	213524.988	kN*m

(c)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	30	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	30.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.299	m
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m
Momento total (M)	1135.658	kN*m
Longitud varilla equivalente (L*)	1.8391	m
Rigidez horizontal Kh	67335.807	kN/m
Rigidez al giro Kθ	213524.988	kN*m

(d)

Figuras 4.26. Características del pilote para $L = 15\text{m} - 20\text{m} - 25\text{m} - 30\text{m}$ (Normativas)

Desplazamiento lateral (Broms y Normativas)

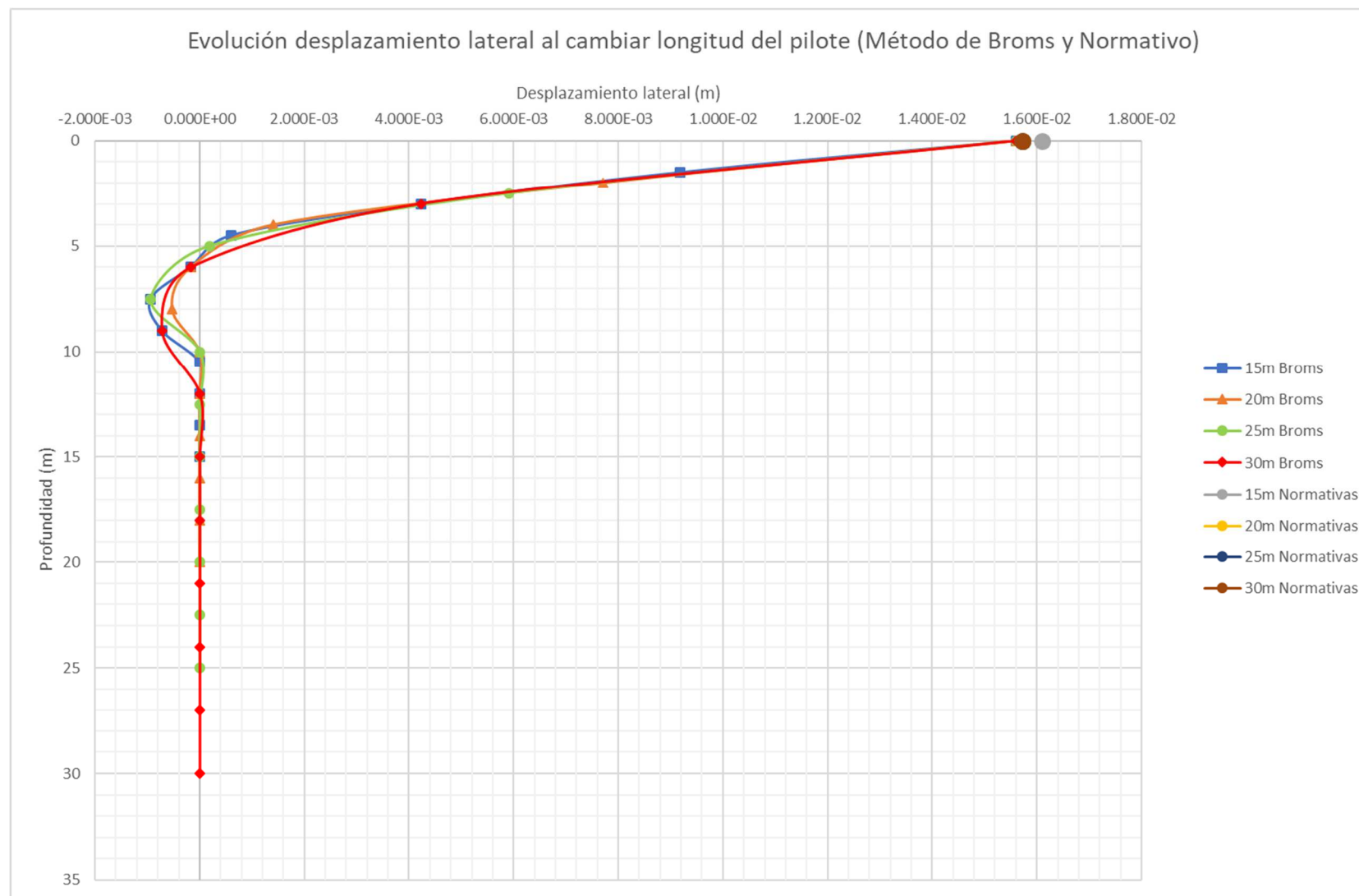


Figura 4.27. Evolución desplazamiento lateral al cambiar longitud del pilote (Broms y Normativas)

Método normativo y analítico (Broms). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Giro (Broms y Normativas)

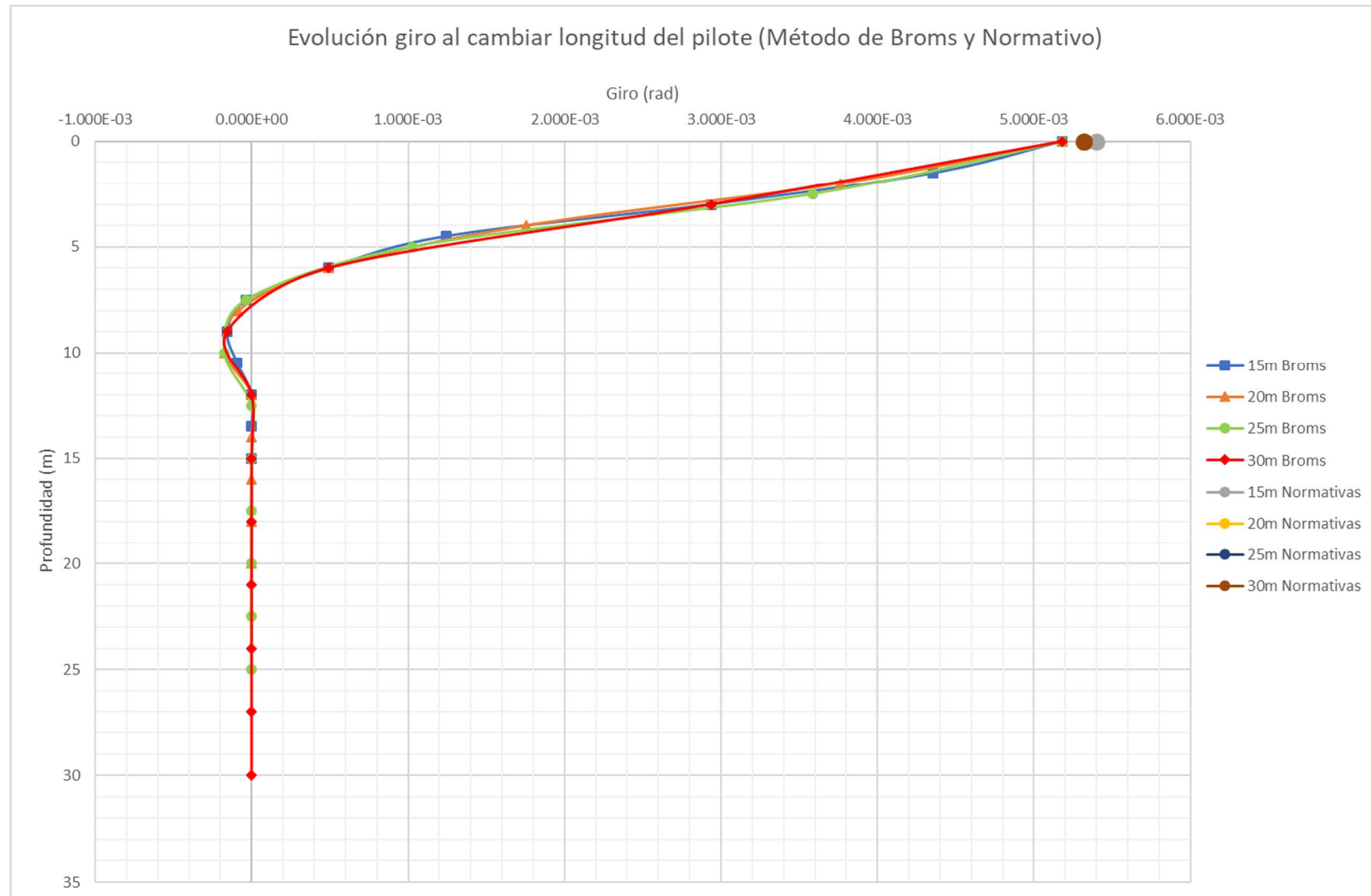


Figura 4.28. Evolución giro al cambiar longitud del pilote (Broms y Normativas)

Momento flector (Broms y Normativas)

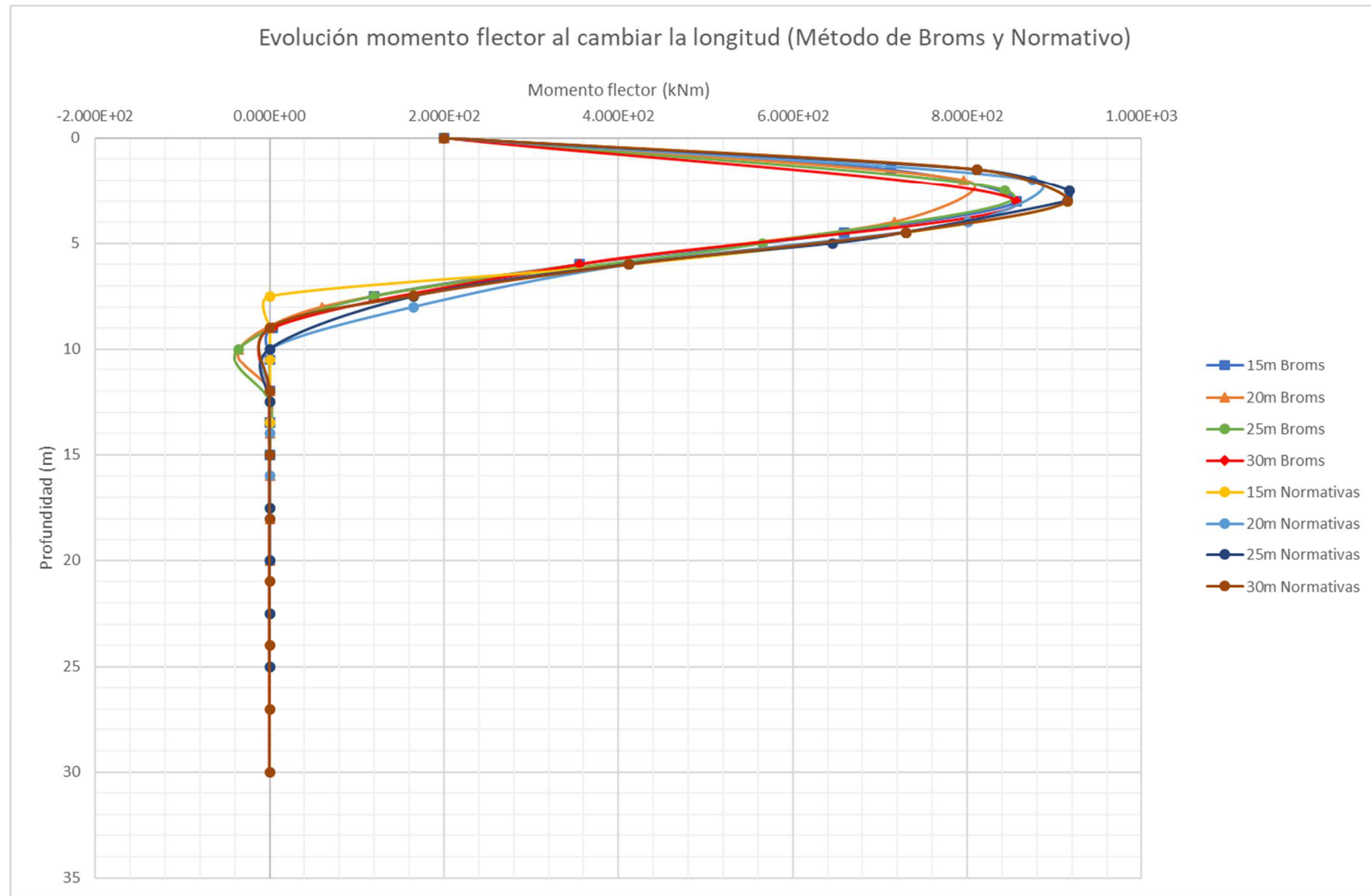


Figura 4.29. Evolución momento flector al cambiar longitud del pilote (Broms y Normativas)

Esfuerzo cortante (Broms y Normativas)

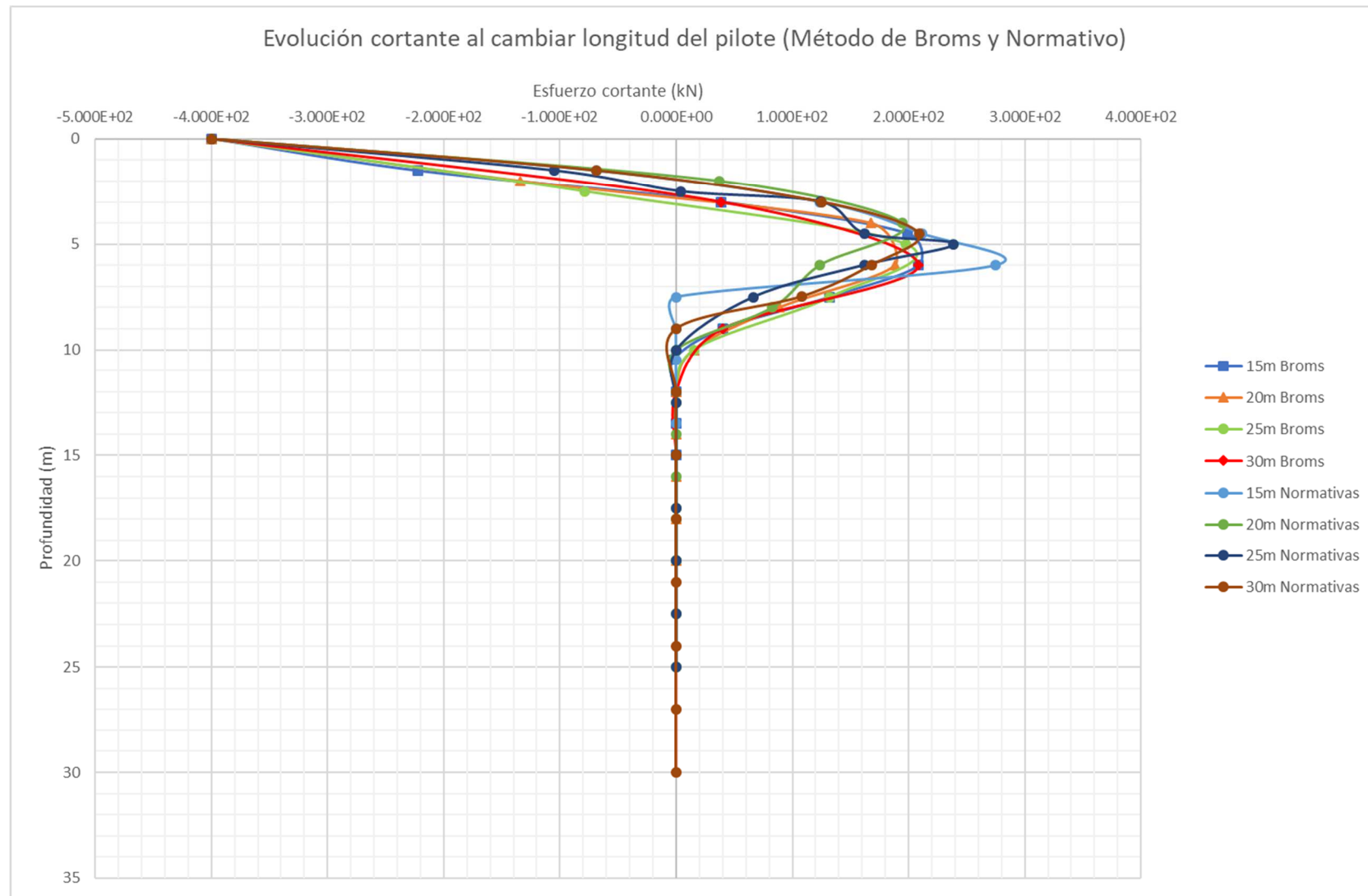


Figura 4.30. Evolución esfuerzo cortante al cambiar longitud del pilote (Broms y Normativas con criterio del CTE)

Comentarios

A partir de las **figuras 4.27 a 4.30** y para los métodos de Broms y normativos en terrenos granulares, al igual que en terrenos arcillosos, se pueden hacer los siguientes comentarios respecto al cambio de la longitud del pilote:

- **Desplazamiento lateral (Broms):** Se observa de la **figura 4.27** que el desplazamiento de la cabeza del pilote para el caso de tener un pilote de 15m de longitud es el mismo que el del pilote de 30m. Esto se debe a que los coeficientes F_{II} son los mismos para todos los casos porque la curva del ábaco utilizada vale para relaciones L/T desde 5 hasta 10. Los desplazamientos son máximos en cabeza y mínimos o nulos a profundidades del entorno de los 12m. En cabeza y hasta los 4m de profundidad, la longitud del pilote no afecta al comportamiento del mismo.
- **Desplazamiento lateral (Normativas):** En el método normativo, la longitud sí tiene un mayor efecto en el desplazamiento lateral de la cabeza del pilote: a menor longitud del pilote, mayores desplazamientos. La diferencia entre el desplazamiento en cabeza del pilote de 15m y el de 30m es de 4mm. También se observa que aumentar la longitud del pilote más de 20m es innecesario si se busca un desplazamiento menor: los desplazamientos experimentados por el pilote de 20m de longitud y el de 30m son los mismos.
- **Giros:** Se observa en la **figura 4.28** que con los giros ocurre algo similar que con los desplazamientos: el aumento de longitud no provoca un decrecimiento considerable del giro, sobre todo para las normativas ya que el giro experimentado por el pilote de 20m permanece inalterable con el aumento de longitud.
- **Momentos flectores:** Se observa en la **figura 4.29** una tendencia hacia un valor constante del momento flector en ambos modelos. Este máximo momento flector se mueve entre los 2m-3m de profundidad. En sendos métodos, los momentos flectores tienden a anularse para profundidades superiores a los 12m.
- **Esfuerzo cortante:** Se puede ver en la **figura 4.30** que la longitud influye levemente en ambos métodos, siendo su mayor influencia en el método normativo. Los cortantes tienden a anularse con la profundidad y el valor máximo positivo se produce entre los 5m-6m de profundidad. Centrándonos en los valores positivos del esfuerzo cortante, este valor es muy parecido para ambos métodos, aunque para el método normativo su valor se ve incrementado levemente con el descenso de la longitud del pilote.

Resumen diferencias entre los métodos: El método de Broms arroja menores desplazamientos en cabeza y esfuerzos que el método normativo para una misma longitud del pilote, al igual que ocurría en el terreno cohesivo. En cuanto a los valores máximos, tanto de momento flector como de cortante, los valores son muy parecidos para ambos métodos. Centrándonos en el máximo cortante positivo, éste tiende a un valor constante para el método de Broms. Para el método normativo, este valor es algo menor para un pilote de 30m de longitud que para uno de 15m.

Podemos concluir, por tanto, que en terrenos arenosos la influencia de la longitud es nimia para el método de Broms y mínima para el método normativo en el cálculo de desplazamientos y esfuerzos cuando un pilote se encuentra sometido a una carga lateral y un momento en cabeza.

4.3.2 Influencia del diámetro del pilote para los métodos de cálculo de Broms y Normativas

Los parámetros del terreno son los mismos que los recogidos en la **tabla 4.4.** y los del pilote se exponen a continuación según el método de cálculo (**figuras 4.31 y 4.32**).

En una hoja Excel se ha programado el cálculo del momento de inercia I_p del pilote, así como la longitud, diámetro, material del pilote, condición de contorno en la cabeza y otros parámetros necesarios para poder calcular tanto los desplazamientos como esfuerzos según el método analítico de Broms y el método normativo. Estos parámetros son los que aparecen en las ecuaciones (2.12)-(2.19)-(2.20)-(2.21)-(2.24)-(2.31).

Se muestra en las **figuras 4.31 y 4.32** las características del pilote de HA para diámetros del pilote igual a 0.85m–1.00m–1.25m–1.50m según el método de Broms (**figura 4.31**) y según el método normativo (**figura 4.32**).

En las **figuras 4.33 a 4.36** se muestran los resultados obtenidos de aplicar una fuerza lateral de 400kN y un momento flector de 200kNm en la cabeza del pilote según el método de Broms y de las normativas.

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.299	m
Relación L/T	6.525	
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m

(a)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	1.00	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0491	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.618	m
Relación L/T	5.729	
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m

(b)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	1.25	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.1198	m ⁴
Longitud elástica (T)	3.130	m
Relación L/T	4.793	
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m

(c)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	1.50	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.2485	m ⁴
Longitud elástica (T)	3.621	m
Relación L/T	4.142	
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m

(d)

Figuras 4.31. Características del pilote para $d = 0.85\text{m} - 1.00\text{m} - 1.25\text{m} - 1.50\text{m}$ (Broms)

Método normativo y analítico (Broms). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	15.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.299	m
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m
Momento total (M)	1152.816	kN*m
Longitud varilla equivalente (L*)	1.8820	m
Rigidez horizontal Kh	67335.807	kN/m
Rigidez al giro Kθ	213524.988	kN*m

(a)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	1.00	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	15.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0491	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.618	m
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m
Momento total (M)	1277.765	kN*m
Longitud varilla equivalente (L*)	2.1944	m
Rigidez horizontal Kh	87332.479	kN/m
Rigidez al giro Kθ	359176.690	kN*m

(b)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	1.25	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	15.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.1198	m ⁴
Longitud elástica (T)	3.130	m
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m
Momento total (M)	1482.839	kN*m
Longitud varilla equivalente (L*)	2.7071	m
Rigidez horizontal Kh	123983.147	kN/m
Rigidez al giro Kθ	733533.894	kN*m

(c)

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	1.50	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	15.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.2485	m ⁴
Longitud elástica (T)	3.621	m
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m
Momento total (M)	1684.570	kN*m
Longitud varilla equivalente (L*)	3.2114	m
Rigidez horizontal Kh	161104.875	kN/m
Rigidez al giro Kθ	1280097.588	kN*m

(d)

Figuras 4.32. Características del pilote para $d = 0.85\text{m} - 1.00\text{m} - 1.25\text{m} - 1.50\text{m}$ (Normativas)

Desplazamiento lateral (Broms y Normativas)

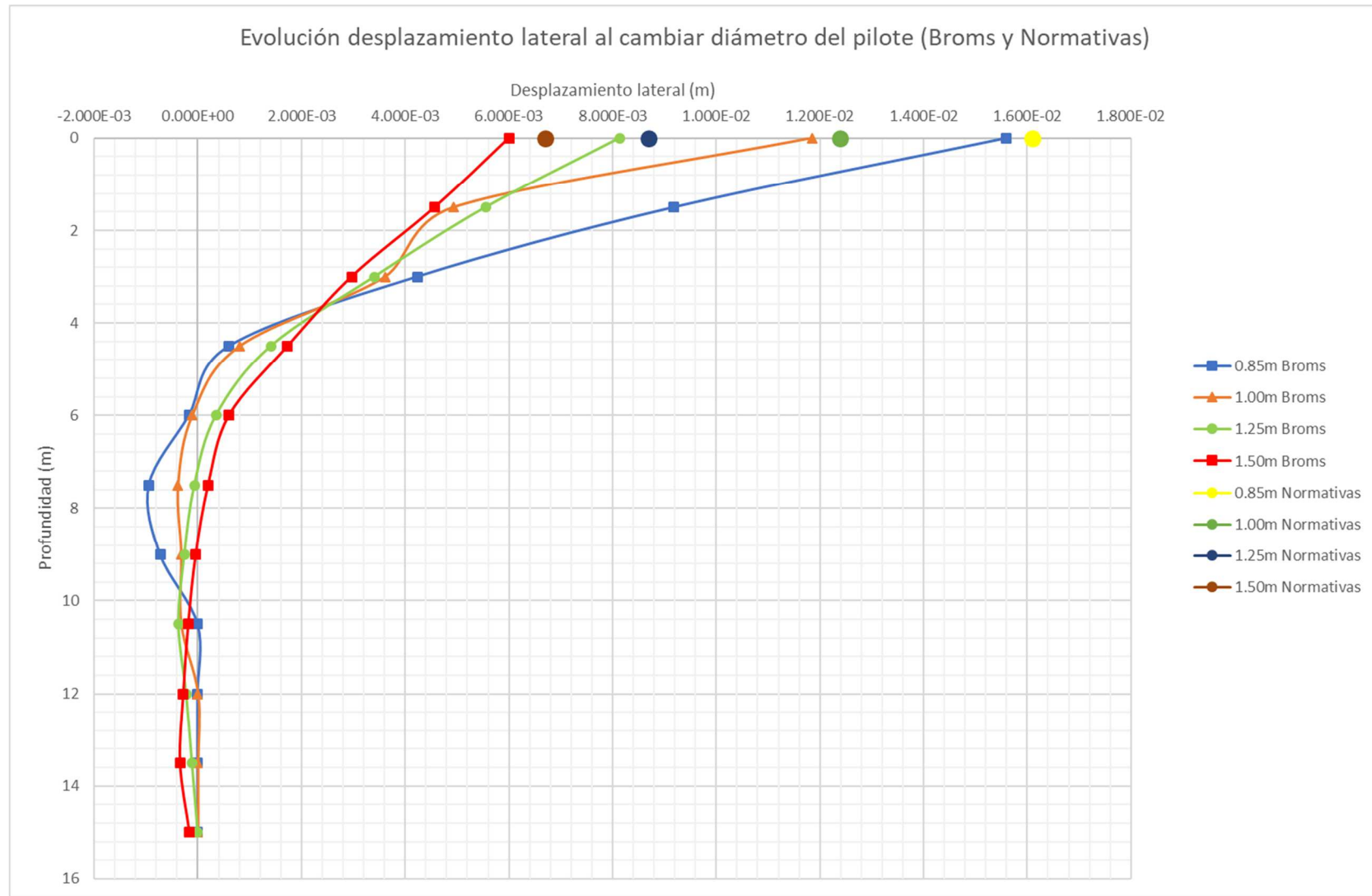


Figura 4.33. Evolución desplazamiento lateral al cambiar diámetro del pilote (Broms y Normativas)

Giro (Broms y Normativas)



Figura 4.34. Evolución giro al cambiar diámetro del pilote (Broms y Normativas)

Momento flector (Broms y Normativas)

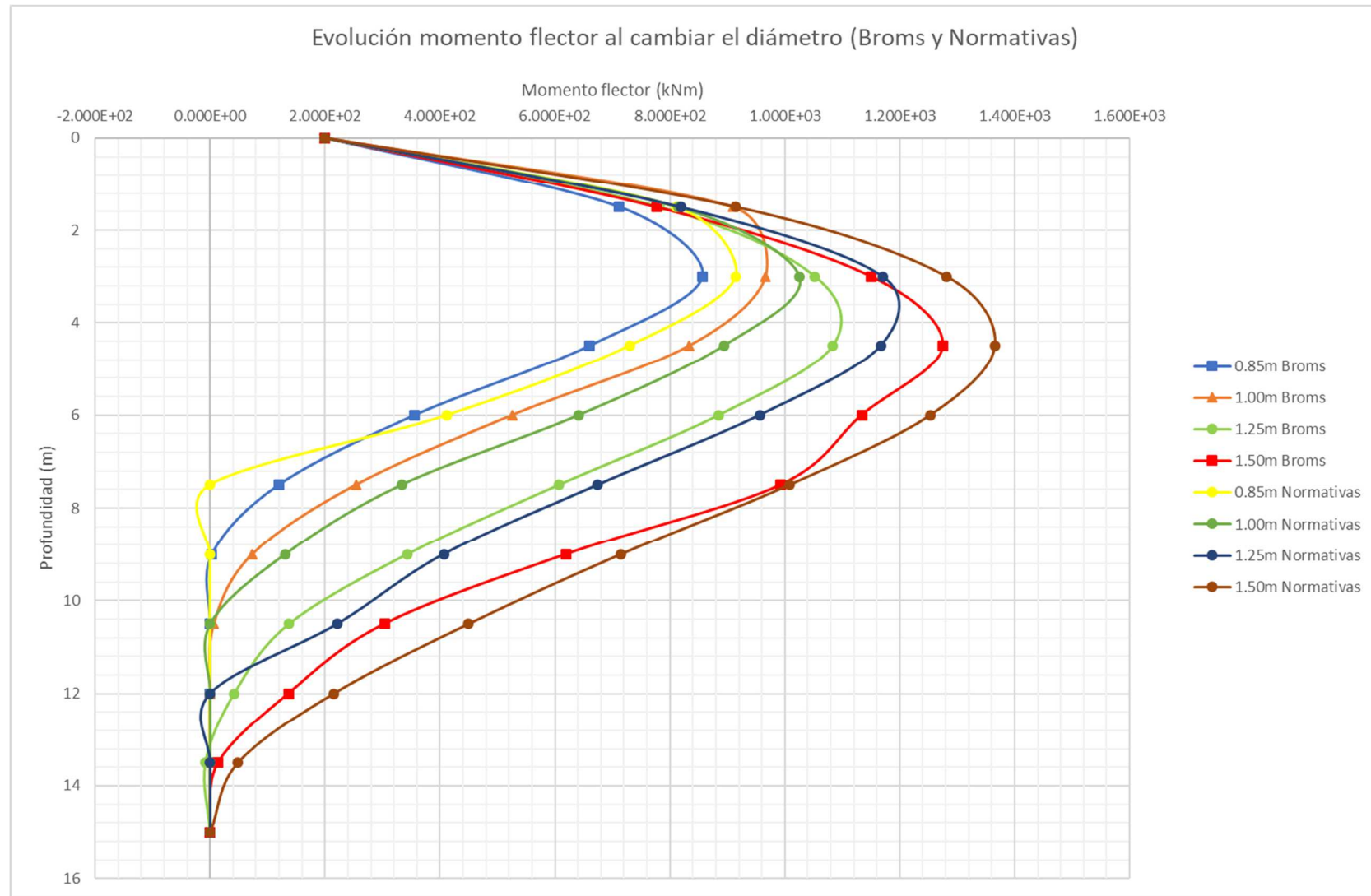


Figura 4.35. Evolución momento flector al cambiar diámetro del pilote (Broms y Normativas)

Esfuerzo cortante (Broms y Normativas)

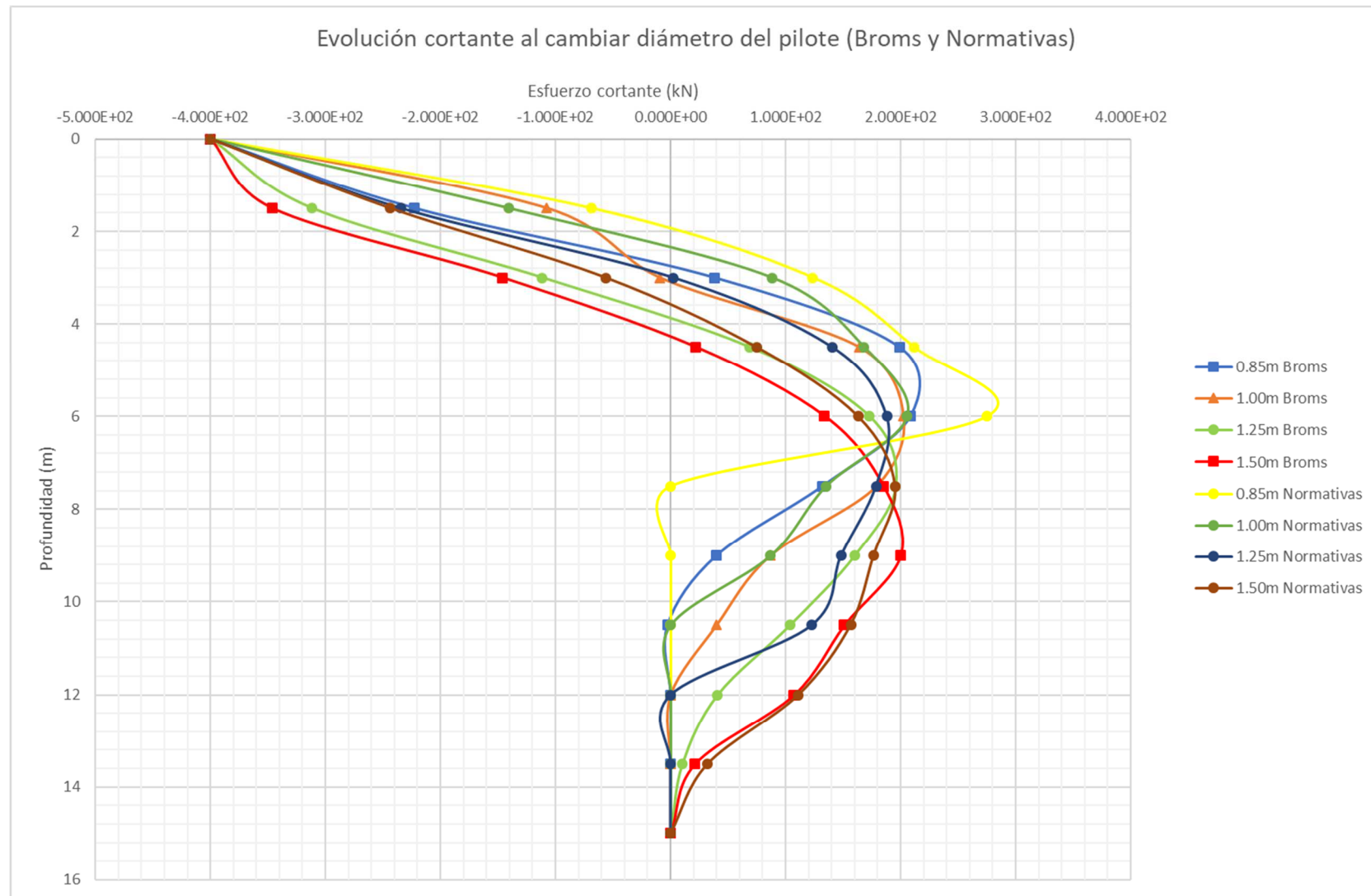


Figura 4.36. Evolución esfuerzo cortante al cambiar diámetro del pilote (Broms y Normativas con criterio del CTE)

Comentarios

Para el método de Broms y los normativos en arena, cambiar el diámetro del pilote sí tiene un mayor efecto en los resultados:

- **Desplazamiento:** En la **figura 4.33** se observa que, al disminuir el diámetro, los mayores desplazamientos en la cabeza del pilote corresponden al método normativo. El desplazamiento de la cabeza del pilote para el caso de tener un diámetro de 0.85m es superior al experimentado por un pilote de 1.50m de diámetro en ambos modelos. La diferencia entre estos dos casos es de, aproximadamente, 10mm en el caso del método de Broms y de 9.4mm en el caso normativo.
- **Giro:** los valores del giro en la cabeza del pilote descienden de manera considerable con el aumento del diámetro (v. **figura 4.34**). El pilote de 0.85m suele girar cuatro veces más que el pilote de 1.50m en cabeza. Esta tendencia se observa en sendas metodologías. Según el método de Broms, a lo largo del fuste, el giro tiende a disminuir de valor y a cambiar de signo a medida que aumenta la profundidad.
- **Momento flector:** Se puede ver en la **figura 4.35** que los mayores momentos son debidos al modelo normativo para un mismo diámetro. El aumento del diámetro se traduce en un aumento del momento flector soportado: el pilote de 1.50m soporta un momento flector 1.5 veces mayor que el pilote de 0.85m. A su vez, este valor máximo se produce a mayor profundidad con el aumento del área del pilote. Se observa también que los momentos tienden a disminuir al aumentar la profundidad a partir de los 5m.
- **Esfuerzo cortante:** Se aprecia en la **figura 4.36** que ocurre un hecho similar al experimentado en arcilla: los cortantes negativos en ambos métodos aumentan al aumentar el diámetro del pilote y disminuyen con la profundidad. Por otro lado, los cortantes positivos alcanzan un valor máximo, relativamente, de valor constante (excepto para el método normativo en un pilote de $d=0.85m$) que se produce a mayor profundidad con el aumento del diámetro. En sendos métodos, el punto donde se alcanza el valor nulo se da, igualmente, a mayor profundidad en el pilote de 1.50m de diámetro.

Resumen diferencias entre los métodos: El método de Broms arroja menores desplazamientos en cabeza y momentos flectores que el método normativo para un mismo diámetro. Sin embargo, el comportamiento es contrario para los cortantes negativos: el método analítico proporciona mayores valores que el normativo para un mismo diámetro. En cuanto a los valores máximos, el máximo momento flector corresponde al método normativo. Para el máximo cortante positivo, ambos métodos tienden a un cierto valor constante que se produce a mayor profundidad con el aumento del área del pilote.

Podemos concluir, por tanto, que el diámetro sí es un parámetro determinante tanto para el método de Broms como para el método normativo en el cálculo de los desplazamientos y esfuerzos en un terreno granular cuando un pilote está sometido a una carga lateral y un momento en la cabeza.

4.3.3 Influencia de la compacidad del terreno para los métodos de cálculo de Broms y Normativas

Los parámetros del terreno (tabla 4.5) y del pilote (**figuras 4.37 y 4.38**) se exponen a continuación según el método de cálculo.

Compacidad del terreno	Peso específico aparente γ [kN/m ³]	Peso específico saturado γ_{SAT} [kN/m ³]	Ángulo de rozamiento interno ϕ (°)	N_{SPT}	Coefficiente A	Coefficiente de reacción n_H (kN/m ³)
Floja	17	20	30	10	300	3777.78
Media	20	23	35	26	860	12740.74
Densa	21	23	40	46	1800	28000.00

Tabla 4.5. Parámetros terreno granular según compacidad del terreno a partir de la ecuación (2.13).

En una hoja Excel se ha programado el cálculo del momento de inercia I_p del pilote, así como la longitud, diámetro, material del pilote, condición de contorno en la cabeza y otros parámetros necesarios para poder calcular tanto los desplazamientos como esfuerzos según el método analítico de Broms y el método normativo. Estos parámetros son los que aparecen en las ecuaciones (2.12)-(2.19)-(2.20)-(2.21)-(2.24)-(2.31).

Se muestra en las **figuras 4.37 y 4.38** las características del pilote de HA en caso de estar enterrados en una arena floja, media o densa según el método de Broms (**figura 4.37**) y según el método normativo (**figura 4.38**).

En las **figuras 4.39 a 4.42** se muestran los resultados obtenidos de aplicar una fuerza lateral de 400kN y un momento flector de 200kNm en la cabeza del pilote según el método de Broms y de las normativas.

Parámetros del pilote (arena floja)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.932	m
Relación L/T	5.117	
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m

(a)

Parámetros del pilote (arena media)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.299	m
Relación L/T	6.525	
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m

(b)

Parámetros del pilote (arena densa)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	1.964	m
Relación L/T	7.638	
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m

(c)

Figuras 4.37. Características del pilote para arena floja, media y densa (Broms)

Método normativo y analítico (Broms). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Parámetros del pilote (arena floja)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	15.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.932	m
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m
Momento total (M)	1402.788	kN*m
Longitud varilla equivalente (L*)	2.5070	m
Rigidez horizontal Kh	32469.164	kN/m
Rigidez al giro Kθ	167439.166	kN*m

(a)

Parámetros del pilote (arena media)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	15.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.299	m
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m
Momento total (M)	1152.816	kN*m
Longitud varilla equivalente (L*)	1.8820	m
Rigidez horizontal Kh	67335.807	kN/m
Rigidez al giro Kθ	213524.988	kN*m

(b)

Parámetros del pilote (arena densa)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	15.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	1.964	m
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m
Momento total (M)	1028.468	kN*m
Longitud varilla equivalente (L*)	1.5712	m
Rigidez horizontal Kh	108000.080	kN/m
Rigidez al giro Kθ	249943.230	kN*m

(c)

Figuras 4.38. Características del pilote para arena floja, media y densa (Normativas)

Desplazamiento lateral (Broms y Normativas)

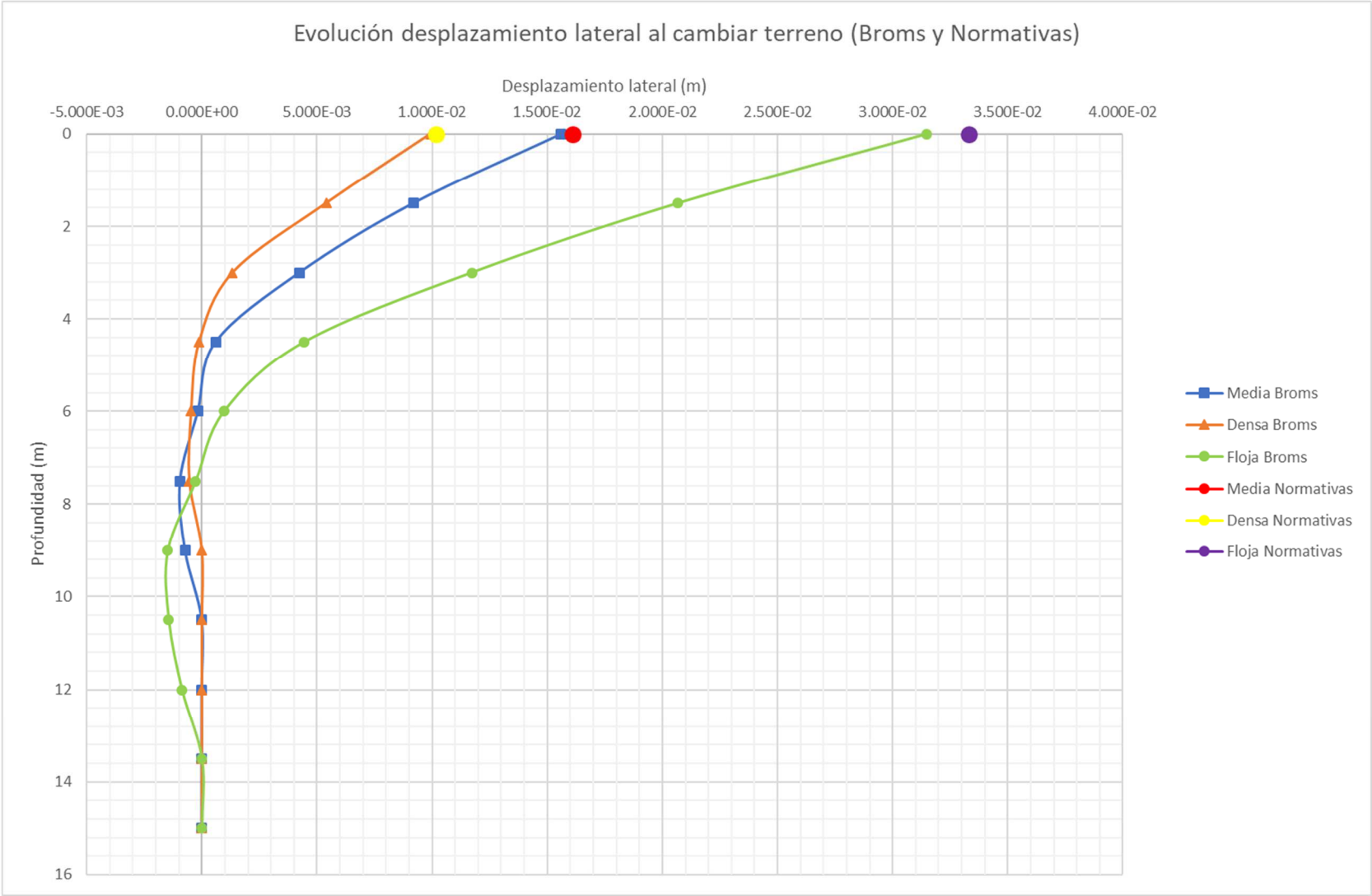


Figura 4.39. Evolución desplazamiento lateral al cambiar compacidad del terreno (Broms y Normativas)

Giro (Broms y Normativas)



Figura 4.40. Evolución giro al cambiar compacidad del terreno (Broms y Normativas)

Momento flector (Broms y Normativas)

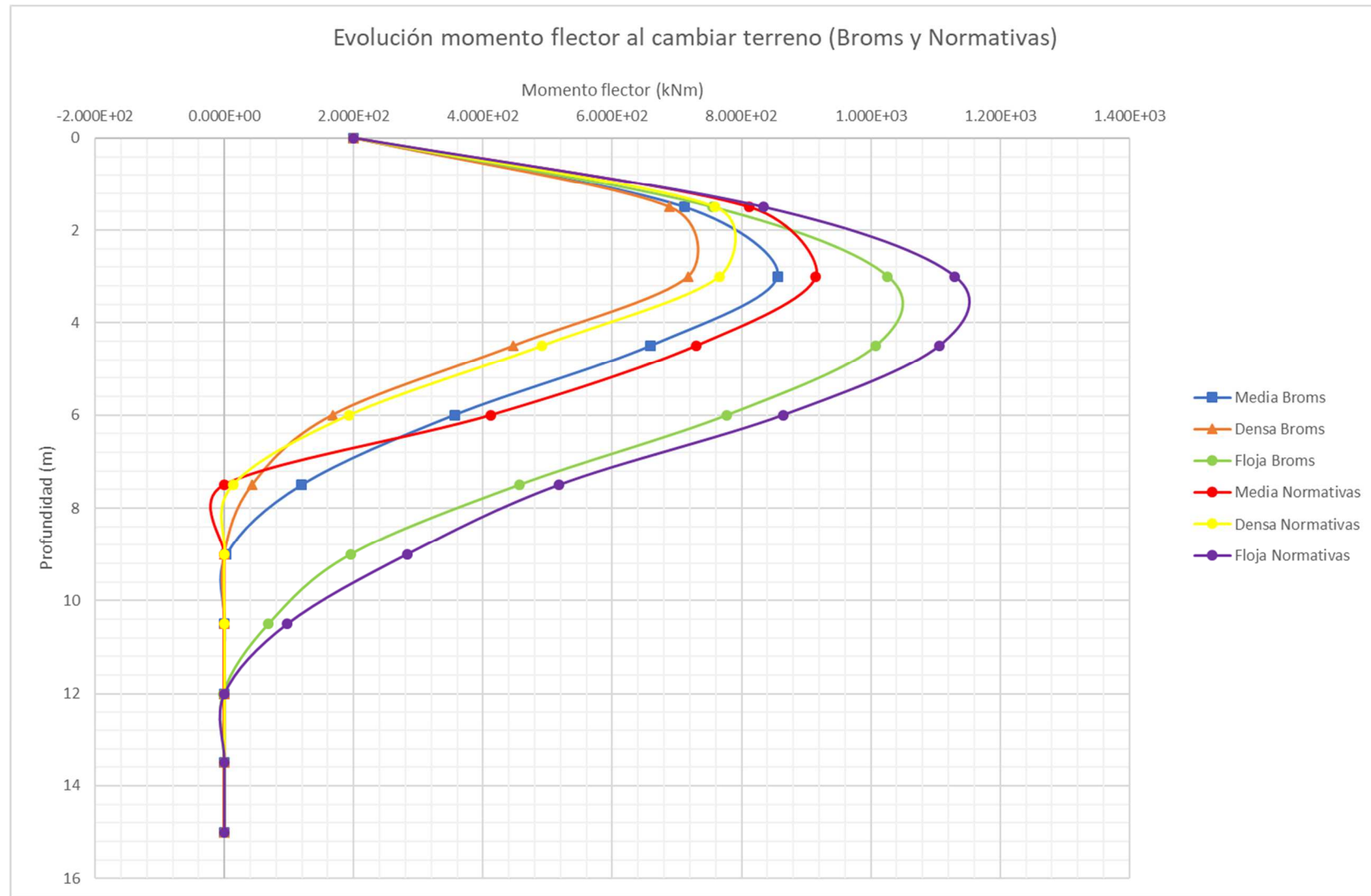


Figura 4.41. Evolución momento flector al cambiar compacidad del terreno (Broms y Normativas)

Esfuerzo cortante (Broms y Normativas)

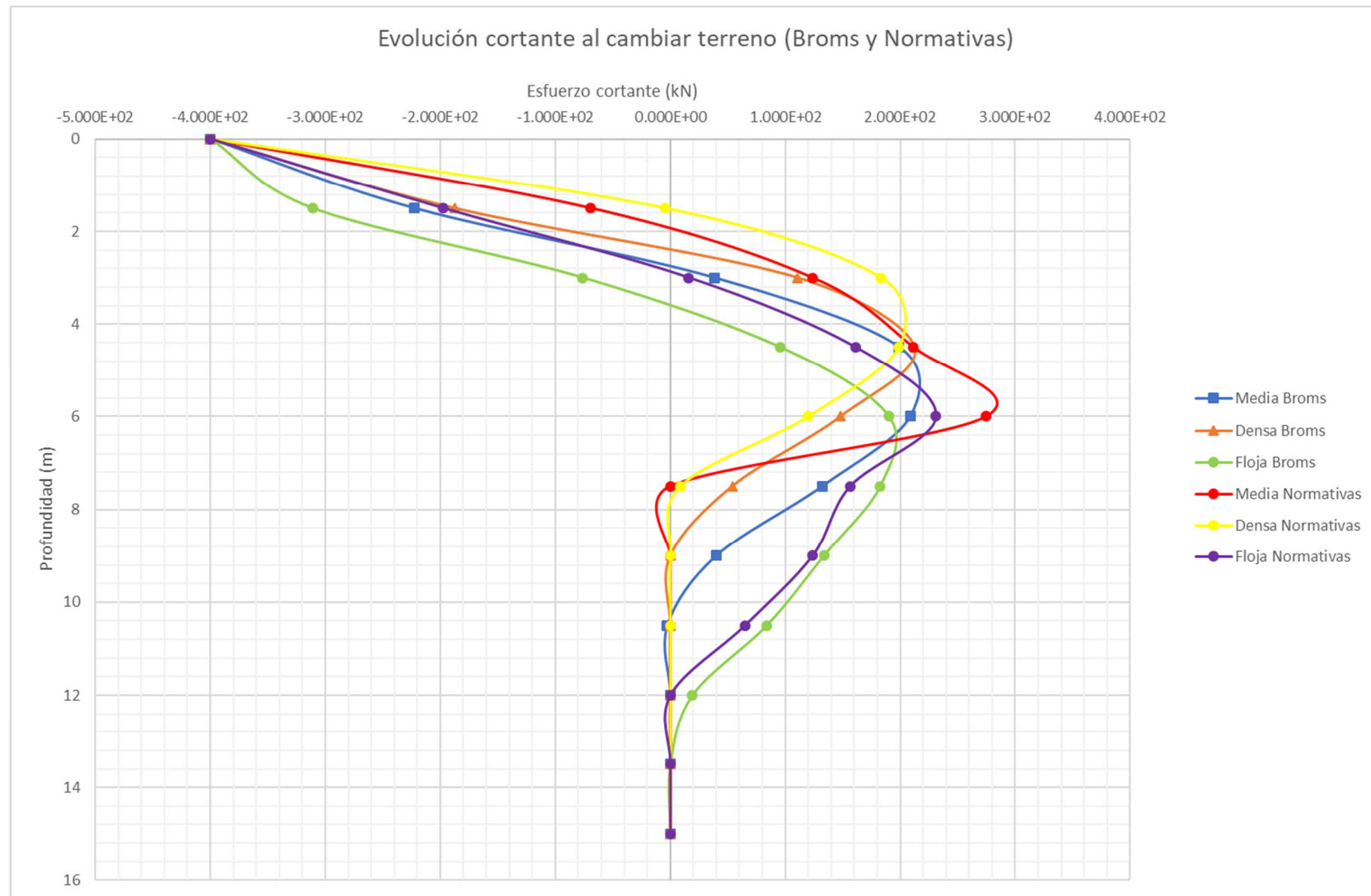


Figura 4.42. Evolución esfuerzo cortante al cambiar compacidad del terreno (Broms y Normativas con criterio del CTE)

Comentarios

Para el método de Broms y los normativos en terrenos arenosos, cambiar la compacidad del terreno tiene un efecto considerable en los resultados:

- **Desplazamiento:** Según la **figura 4.39** y para arena floja, el modelo normativo presenta los mayores desplazamientos en cabeza. El pilote se desplazará más en cabeza si lo enterramos en una arena floja que si lo hacemos en una arena densa. La diferencia entre estos dos casos es de, aproximadamente, 2cm en el caso del método de Broms y de 2.3cm en el caso normativo; prácticamente el triple en ambos modelos. Para cualquier consistencia del terreno, ambos modelos tienden a reducir sus desplazamientos con el aumento de profundidad.
- **Giro:** los valores del giro en la cabeza del pilote también descienden con el aumento de la compacidad de la arena (v. **figura 4.40**). En arena floja, el pilote gira dos veces más que si estuviera en una arena densa. En el modelo de Broms, el giro tiende a disminuir con el aumento de la profundidad.
- **Momento flector:** En la **figura 4.41** se puede observar que los mayores momentos son debidos al modelo normativo para una misma compacidad de la arena y que, a cierta profundidad del terreno, estos esfuerzos tienden a anularse para cualquier compacidad del terreno en sendos modelos. El aumento de la compacidad del terreno se traduce en un descenso del momento flector soportado: un pilote enterrado en una arena floja soporta un momento flector mayor que en una arena densa. ¿A qué se debe esto? En la interfaz terreno flojo-pilote, la distribución de tensiones es casi uniforme y por tanto menor la curvatura. A menor curvatura, mayor serán los momentos en dichos puntos.
- **Esfuerzo cortante:** En la **figura 4.42** se puede observar que se repite el comportamiento del apartado 4.2.3: a mejor terreno, menor esfuerzo cortante para una misma profundidad. Los cortantes negativos aumentan al disminuir la compacidad del terreno y disminuyen con la profundidad. Por otro lado, los cortantes positivos alcanzan un valor máximo, relativamente de valor constante (excepto para el método normativo en arena media), que se produce a mayor profundidad con el descenso de la compacidad de la arena. En ambos métodos, la profundidad donde se alcanza el valor nulo de dicho esfuerzo aumenta con el descenso de la compacidad de la arena. En otras palabras, en una arena floja el esfuerzo cortante se hará nulo a una profundidad mayor que si estuviese el pilote enterrado en una arena densa.

Resumen diferencias entre los métodos: El método de Broms arroja menores desplazamientos en cabeza y momentos flectores que el método normativo para una misma compacidad. Sin embargo, el comportamiento es contrario para los cortantes negativos: el método analítico proporciona mayores valores que el normativo para una misma compacidad. En cuanto a los valores máximos, el máximo momento flector corresponde al método normativo. Para el máximo cortante positivo, ambos métodos tienden a un cierto valor constante que se produce a mayor profundidad con el descenso de la compacidad de la arena.

Podemos concluir, por tanto, que la compacidad del terreno es un parámetro determinante en sendos modelos de análisis para el cálculo de los desplazamientos y los esfuerzos cuando un pilote se encuentra sometido a una carga lateral y a un momento en cabeza.

4.3.4 Influencia según material del pilote para los métodos de cálculo de Broms y Normativas

Los parámetros del terreno son los mismos que los recogidos en la **tabla 4.4**. y los del pilote se exponen a continuación según el método de cálculo (**figuras 4.43 y 4.44**).

En una hoja Excel se ha programado el cálculo del momento de inercia I_p del pilote, así como la longitud, diámetro, material del pilote, condición de contorno en la cabeza y otros parámetros necesarios para poder calcular tanto los desplazamientos como esfuerzos según el método analítico de Broms y el método normativo. Estos parámetros son los que aparecen en las ecuaciones (2.12)-(2.19)-(2.20)-(2.21)-(2.24)-(2.31).

Se muestra en las **figuras 4.43 y 4.44** las características del pilote según el material del que está hecho siguiendo el método de Broms (**figura 4.43**) y según el método normativo (**figura 4.44**).

En las **figuras 4.45 a 4.48** se muestran los resultados obtenidos de aplicar una fuerza lateral de 400kN y un momento flector de 200kNm en la cabeza del pilote según el método de Broms y de las normativas.

Parámetros del pilote (HA-45)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.299	m
Relación L/T	6.525	
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m

(a)

Parámetros del pilote (Acero)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	a	
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	210.000	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	3.351	m
Relación L/T	4.477	
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m

(b)

Figuras 4.43. Características del pilote según material: HA-45 o acero (Broms)

Parámetros del pilote (HA-45)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	15.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.299	m
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m
Momento total (M)	1152.816	kN*m
Longitud varilla equivalente (L*)	1.8820	m
Rigidez horizontal Kh	67335.807	kN/m
Rigidez al giro Kθ	213524.988	kN*m

(a)

Parámetros del pilote (Acero)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	a	
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	15.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	210.000	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	3.351	m
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m
Momento total (M)	1572.965	kN*m
Longitud varilla equivalente (L*)	2.9324	m
Rigidez horizontal Kh	140148.983	kN/m
Rigidez al giro Kθ	963209.086	kN*m

(b)

Figuras 4.44. Características del pilote según material: HA-45 o acero (Normativas)

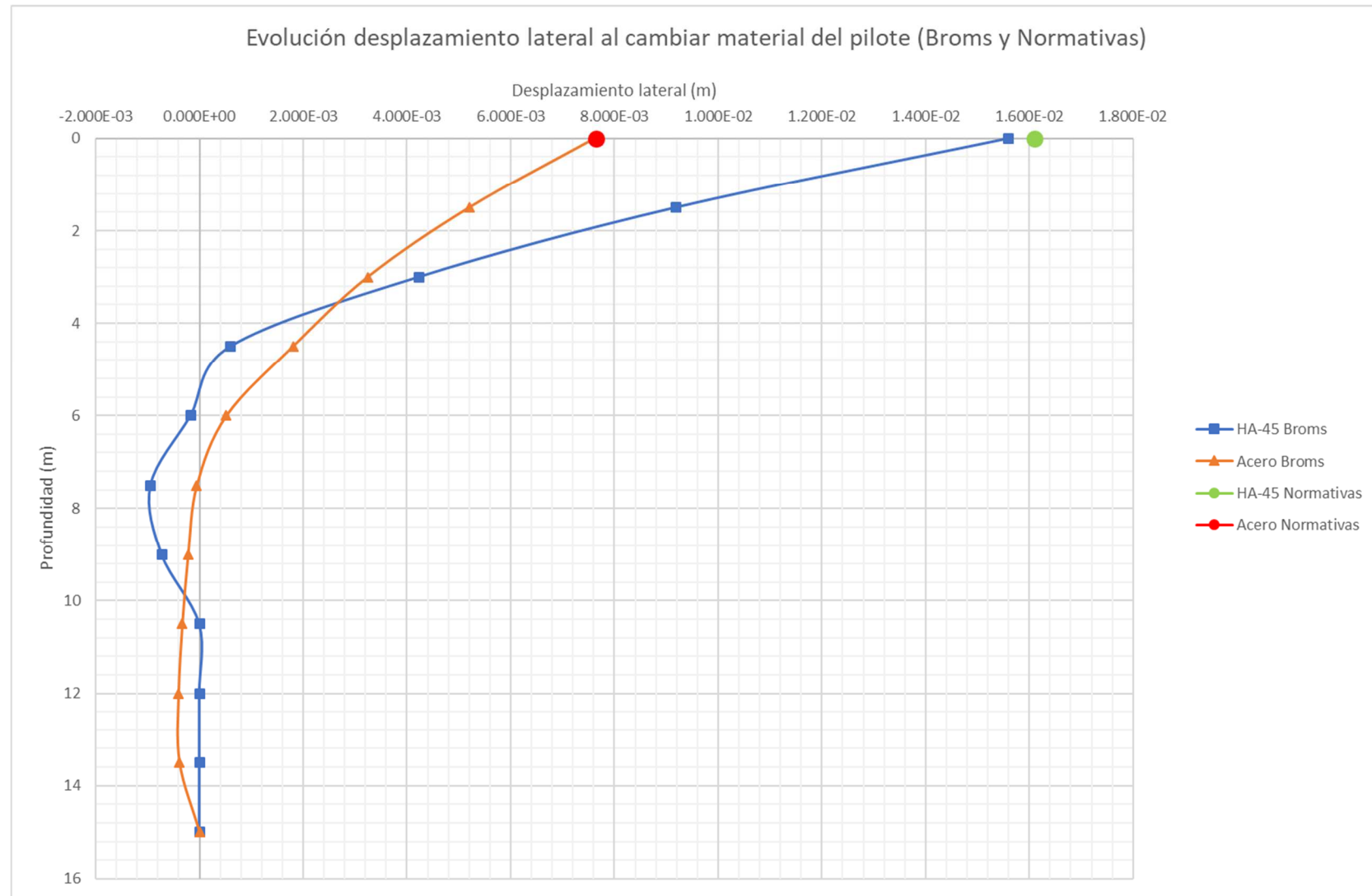
Desplazamiento lateral (Broms y Normativas)

Figura 4.45. Evolución desplazamiento lateral al cambiar material del pilote (Broms y Normativas)

Método normativo y analítico (Broms). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Giro (Broms y Normativas)

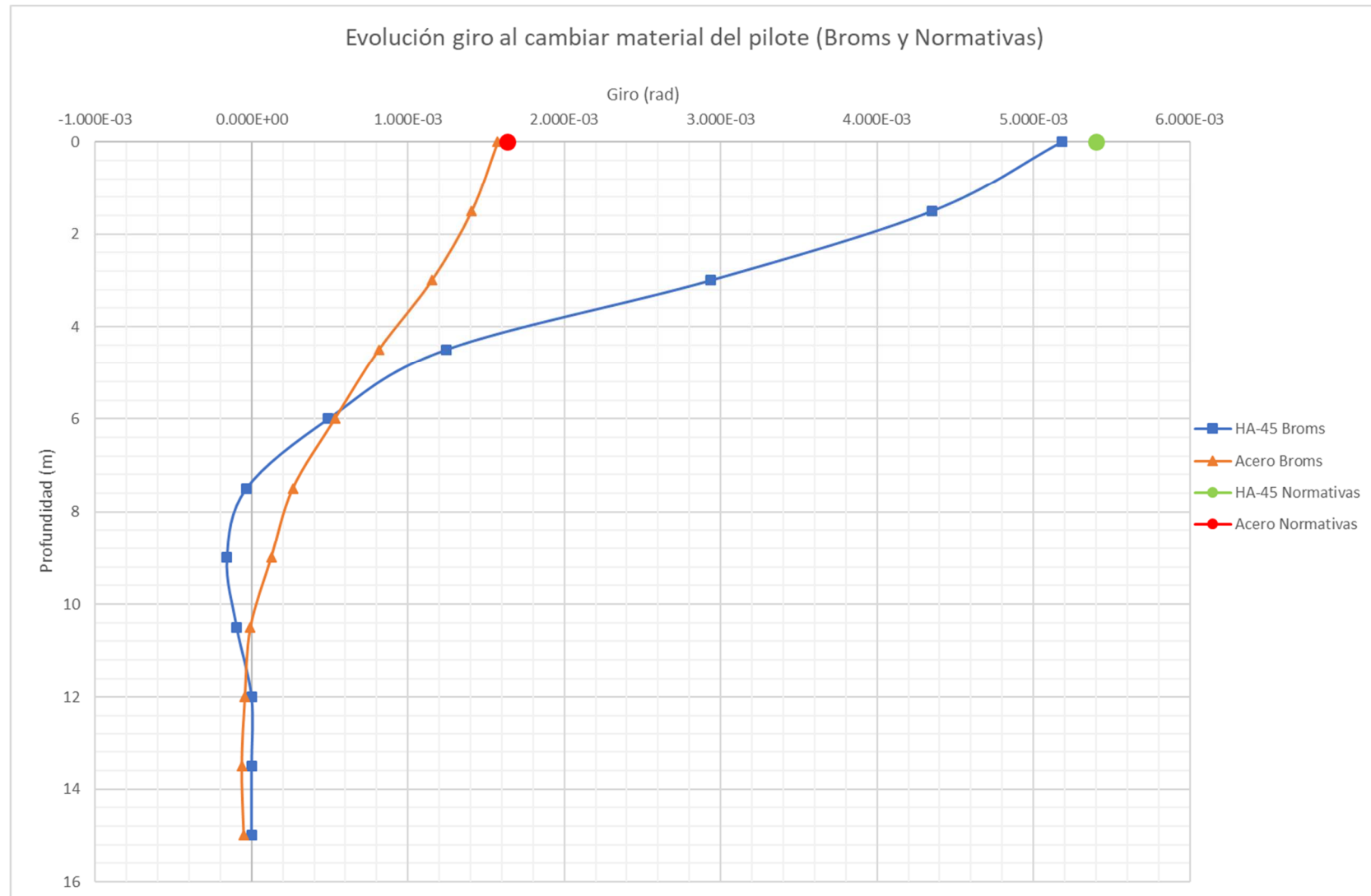


Figura 4.46. Evolución giro al cambiar material del pilote (Broms y Normativas)

Momento flector (Broms y Normativas)

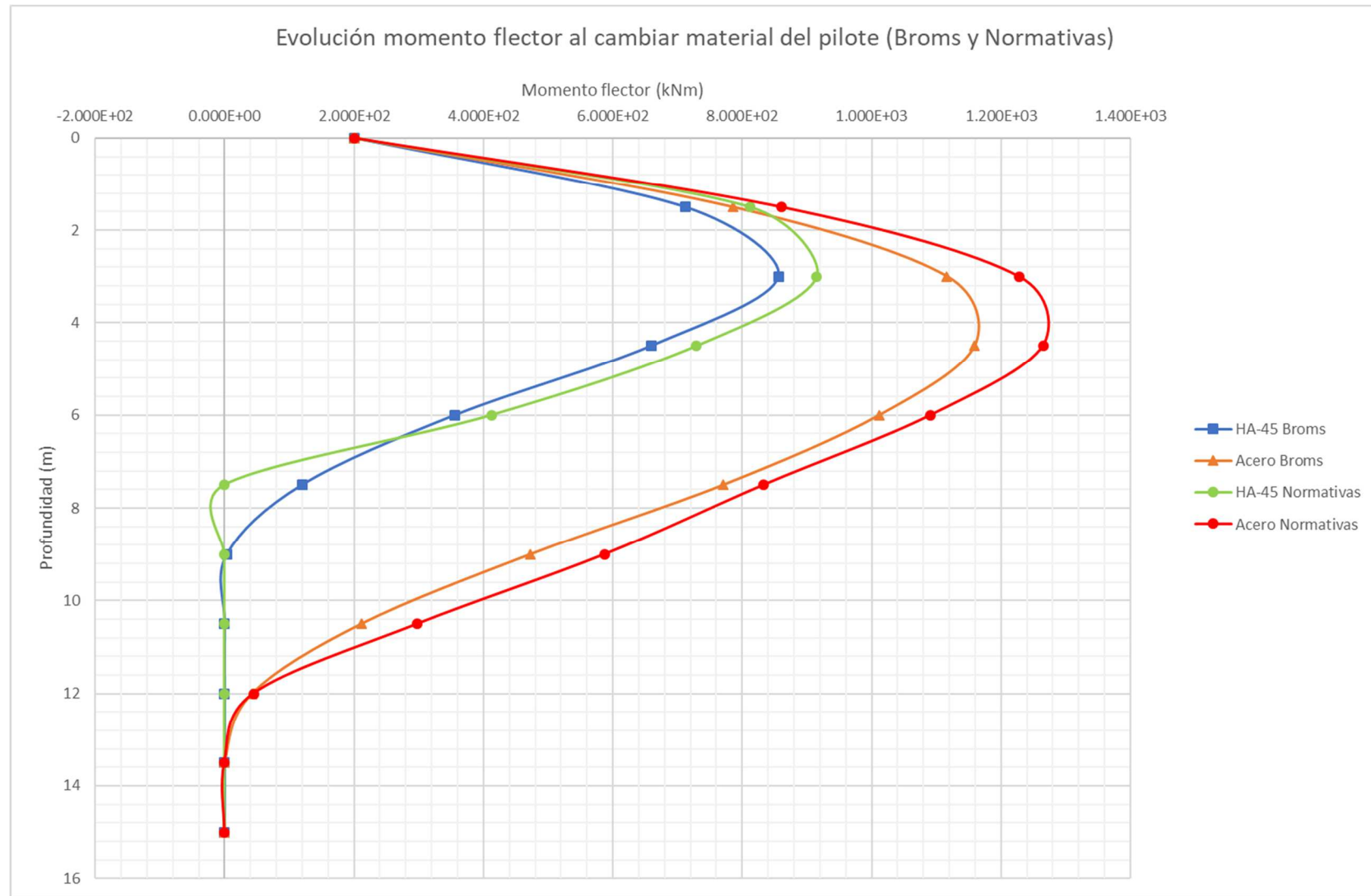


Figura 4.47. Evolución momento flector al cambiar material del pilote (Broms y Normativas)

Esfuerzo cortante (Broms y Normativas)

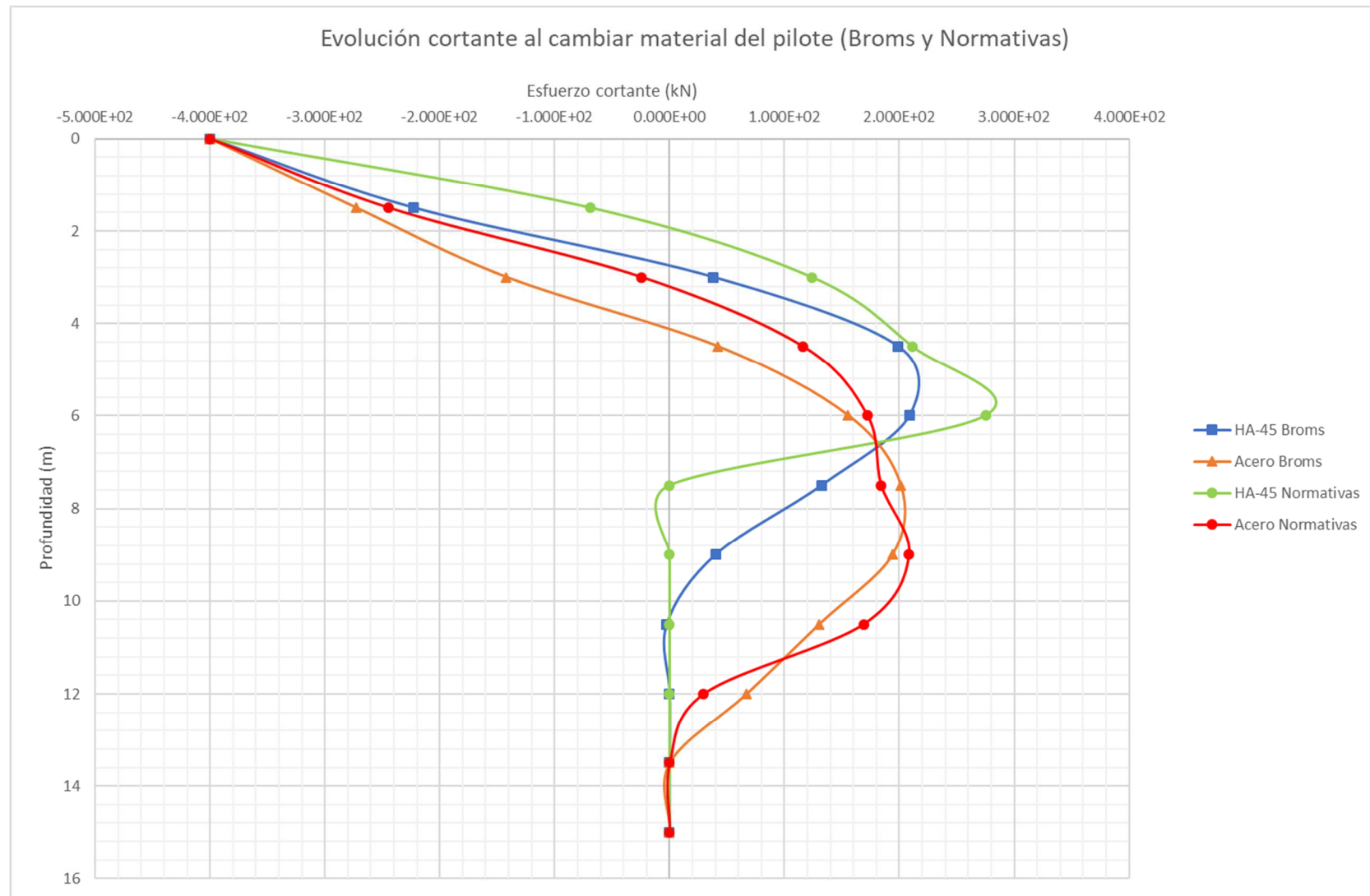


Figura 4.48. Evolución esfuerzo cortante al cambiar material del pilote (Broms y Normativas con criterio del CTE)

Comentarios

Para el método de Broms y los normativos en arenas, cambiar el tipo de pilote tiene un efecto muy destacado en los resultados:

- **Desplazamiento:** En cuanto a los modelos empleados, según la **figura 4.45**, el mayor desplazamiento en cabeza es para el método normativo. El pilote se desplazará más en cabeza si es de hormigón que si es de acero. Esto se debe a que el pilote de HA es menos rígido que el de acero. Sin embargo, la diferencia entre los desplazamientos laterales en los dos tipos de pilote estudiados es menor que en el caso anterior (arena floja y arena densa). La diferencia en cabeza, según ambos métodos, es de 0.8cm. Ambos tipos de pilote disminuyen sus desplazamientos laterales con el aumento de la profundidad en el terreno.
- **Giro:** Los mayores giros se observan, según la **figura 4.46**, con el método normativo. La diferencia que se observa en la cabeza de los pilotes (acero y HA) es mayor en los giros que en los desplazamientos laterales. En ambos modelos, el pilote de hormigón gira más del triple que el pilote de acero en la cabeza. Así mismo, en el modelo de Broms, el giro tiende a disminuir con el aumento de la profundidad.
- **Momento flector:** Puede verse en la **figura 4.47** que, para ambos tipos de pilote, los máximos momentos se aprecian en el modelo normativo. Al pasar de un pilote a otro, en el modelo de Broms existe un incremento de 300 kNm como flector máximo; mientras que para las normativas este incremento es de 350 kNm. Se puede decir que, para este esfuerzo, el material del pilote es un parámetro determinante, soportando un pilote de acero, aproximadamente, un momento flector 1.4 veces mayor. En profundidad se aprecia que los momentos flectores tienden a disminuir o anularse primero en los pilotes de HA y después en los de acero.
- **Esfuerzo cortante:** En la **figura 4.48** puede observarse que, a mayor módulo del pilote E_p , mayor esfuerzo cortante para una misma profundidad (al igual que en terrenos cohesivos). Se repite el comportamiento de los apartados anteriores: los cortantes negativos aumentan al aumentar el módulo del pilote E_p y disminuyen con la profundidad. Por otro lado, los cortantes positivos alcanzan un valor máximo que se produce a mayor profundidad con el aumento del módulo del pilote E_p , pero su valor es mayor en un pilote de HA que en uno de acero. En ambos métodos, la profundidad donde se alcanza el valor nulo de dicho esfuerzo aumenta con el aumento del módulo del pilote E_p . En otras palabras, en un pilote de acero el esfuerzo cortante se hará nulo a una profundidad mayor que si fuese el pilote de HA.

Resumen diferencias entre los métodos: Se observa que el método de Broms arroja menores desplazamientos en cabeza y momentos flectores que el método normativo para un mismo tipo de material y a la misma profundidad. Sin embargo, el comportamiento es contrario para los cortantes negativos: el método analítico proporciona mayores valores que el normativo para un mismo tipo de material. En cuanto a los valores máximos, tanto de momento flector como de cortante, es el método normativo el que proporciona valores máximos superiores para un mismo tipo de material, aunque en acero la diferencia entre métodos es mínima. Para el máximo cortante positivo, éste es mayor en un pilote de HA que en uno de acero para ambos métodos.

Podemos concluir, por tanto, que el tipo de material del pilote es un parámetro determinante en sendos modelos de análisis para el cálculo de los desplazamientos y de esfuerzos en un terreno granular cuando el pilote está sometido a una carga lateral y a un momento en cabeza.

4.3.5 Influencia de la existencia del NF para los métodos de cálculo de Broms y Normativas

Los parámetros del terreno (**figuras 4.49**) y los del pilote (**figuras 4.50**) se exponen a continuación según el método de cálculo.

En una hoja Excel se ha programado el cálculo del momento de inercia I_p del pilote, así como la longitud, diámetro, material del pilote, condición de contorno en la cabeza y otros parámetros necesarios para poder calcular tanto los desplazamientos como esfuerzos según el método analítico de Broms y el método normativo. Estos parámetros son los que aparecen en las ecuaciones (2.12)-(2.19)-(2.20)-(2.21)-(2.24)-(2.31).

Se muestra en las **figuras 4.49 y 4.50** las características del pilote según si el terreno se encuentra sumergido o seco siguiendo el método de Broms (**figura 4.49**) y el método normativo (**figura 4.50**).

En las **figuras 4.51 a 4.54** se muestran los resultados obtenidos de aplicar una fuerza lateral de 400kN y un momento flector de 200kNm en la cabeza del pilote según el método de Broms y de las normativas.

Método de Broms - Normativas		
Parámetros del terreno (sin NF)		
Peso específico no sat (γ unsat)	20	kN/m ³
Peso específico saturado (γ sat)	23	kN/m ³
Ángulo de rozamiento interno (ϕ)	35	°
Nspt	26	Golpes
Coeficiente A (Terzaghi)	860.00	
ζ Suelo sumergido? (S/N)	n	
Peso específico efectivo (γ')	20.00	kN/m ³
Coeficiente de reacción (nh)	12740.74	kN/m ³

(a)

Método de Broms - Normativas		
Parámetros del terreno (con NF)		
Peso específico no sat (γ unsat)	20	kN/m ³
Peso específico saturado (γ sat)	23	kN/m ³
Ángulo de rozamiento interno (ϕ)	35	°
Nspt	26	Golpes
Coeficiente A (Terzaghi)	860.00	
ζ Suelo sumergido? (S/N)	s	
Peso específico efectivo (γ')	13.19	kN/m ³
Coeficiente de reacción (nh)	8402.52	kN/m ³

(b)

Figuras 4.49. Características del terreno según existencia del NF

Parámetros del pilote (Broms sin NF)		
ζ Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
ζ Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.299	m
Relación L/T	6.525	
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m

(a.1)

Parámetros del pilote (Broms con NF)		
ζ Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
ζ Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.499	m
Relación L/T	6.004	
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m

(a.2)

Parámetros del pilote (Normativas sin NF)		
ζ Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
ζ Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	15.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.299	m
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m
Momento total (M)	1152.816	kN*m
Longitud varilla equivalente (L*)	1.8820	m
Rigidez horizontal Kh	67335.807	kN/m
Rigidez al giro K θ	213524.988	kN*m

(b.1)

Parámetros del pilote (Normativas con NF)		
ζ Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
ζ Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	15.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.499	m
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m
Momento total (M)	1230.655	kN*m
Longitud varilla equivalente (L*)	2.0766	m
Rigidez horizontal Kh	52453.557	kN/m
Rigidez al giro K θ	196467.929	kN*m

(b.2)

Figuras 4.50. Características del pilote según existencia del NF (Broms y normativas)

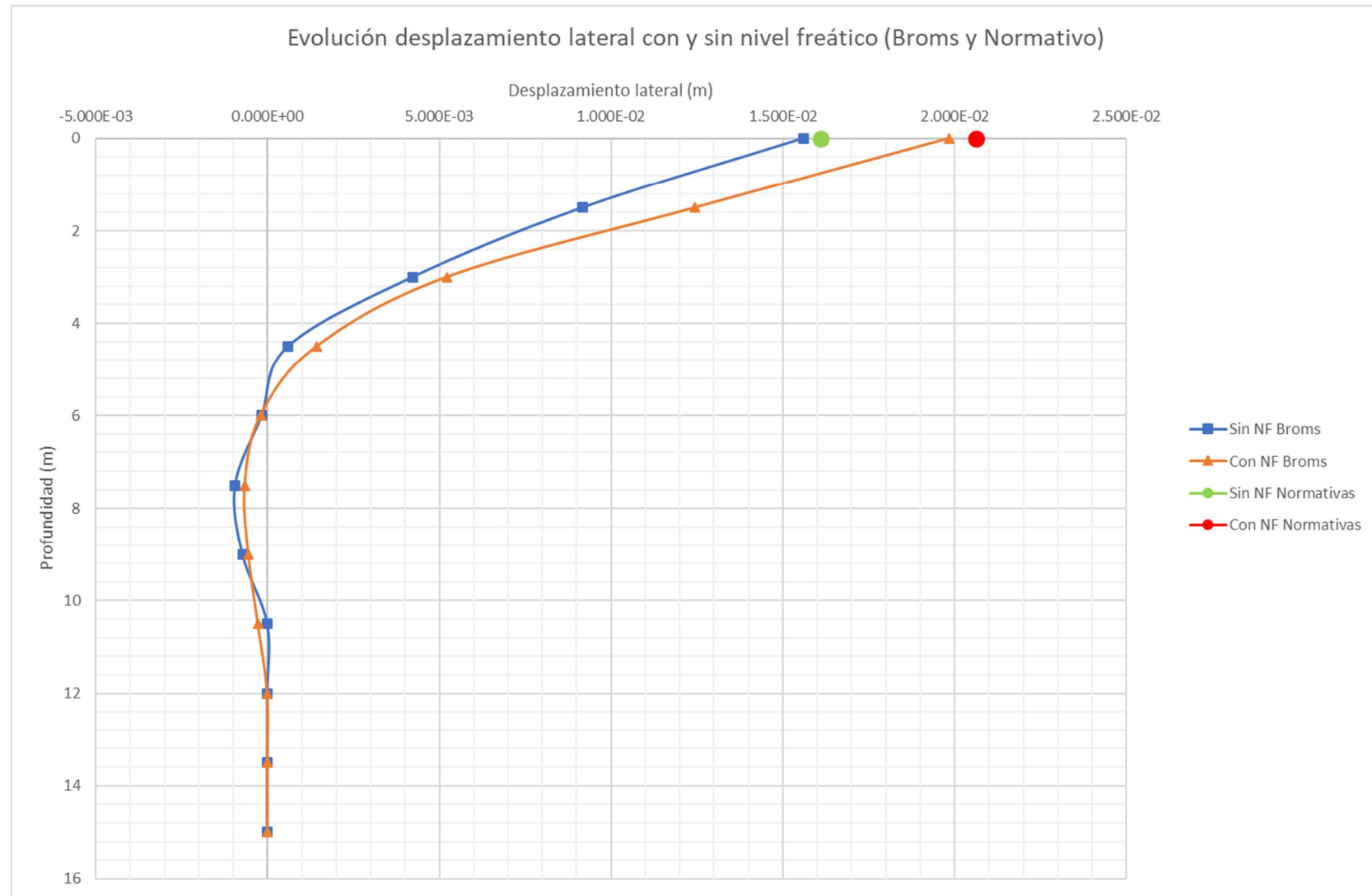
Desplazamiento lateral (Broms y Normativas)

Figura 4.51. Evolución desplazamiento lateral según existencia del NF (Broms y Normativas)

Método normativo y analítico (Broms). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Giro (Broms y Normativas)

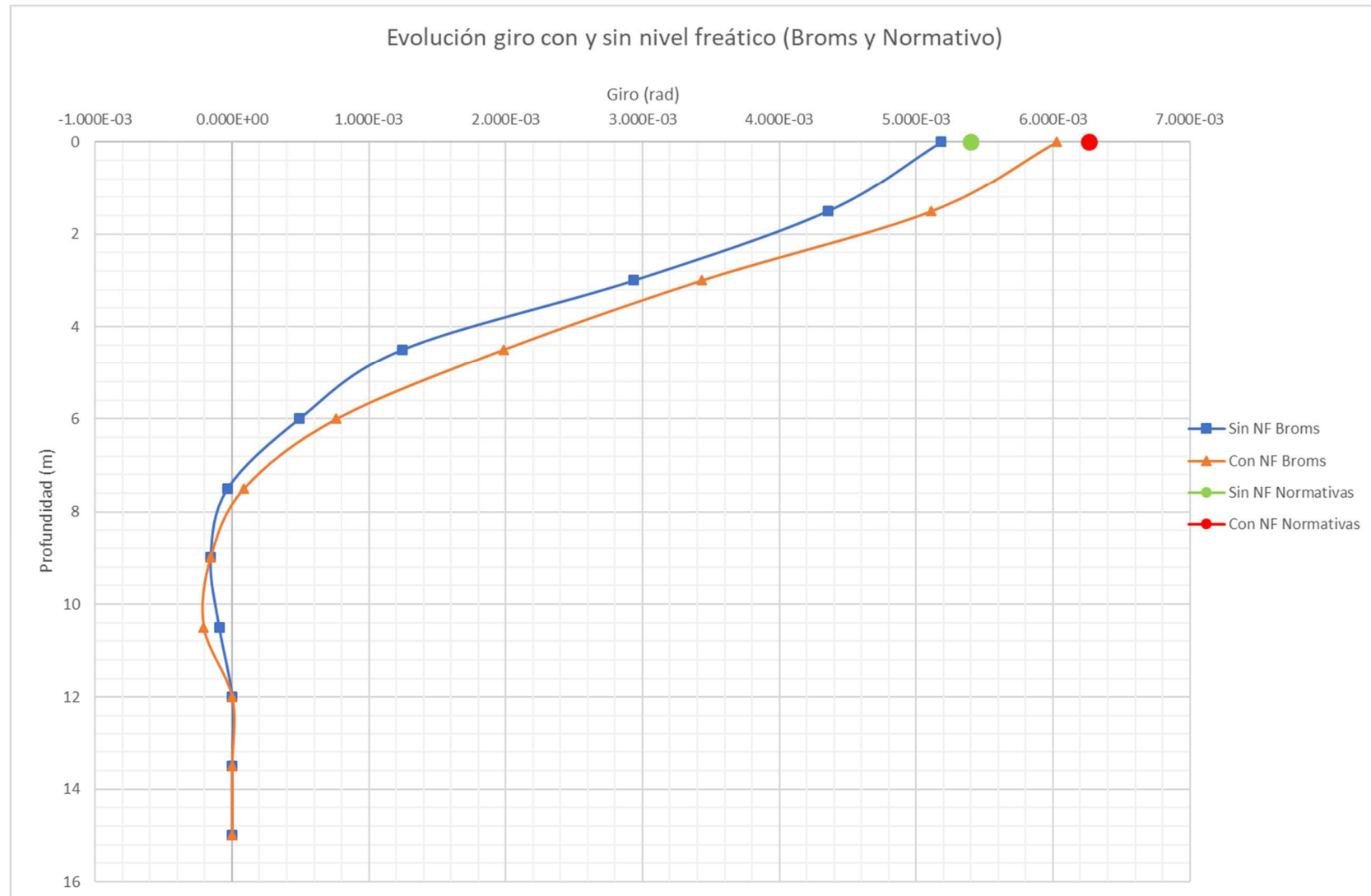


Figura 4.52. Evolución giro según existencia del NF (Broms y Normativas)

Momento flector (Broms y Normativas)

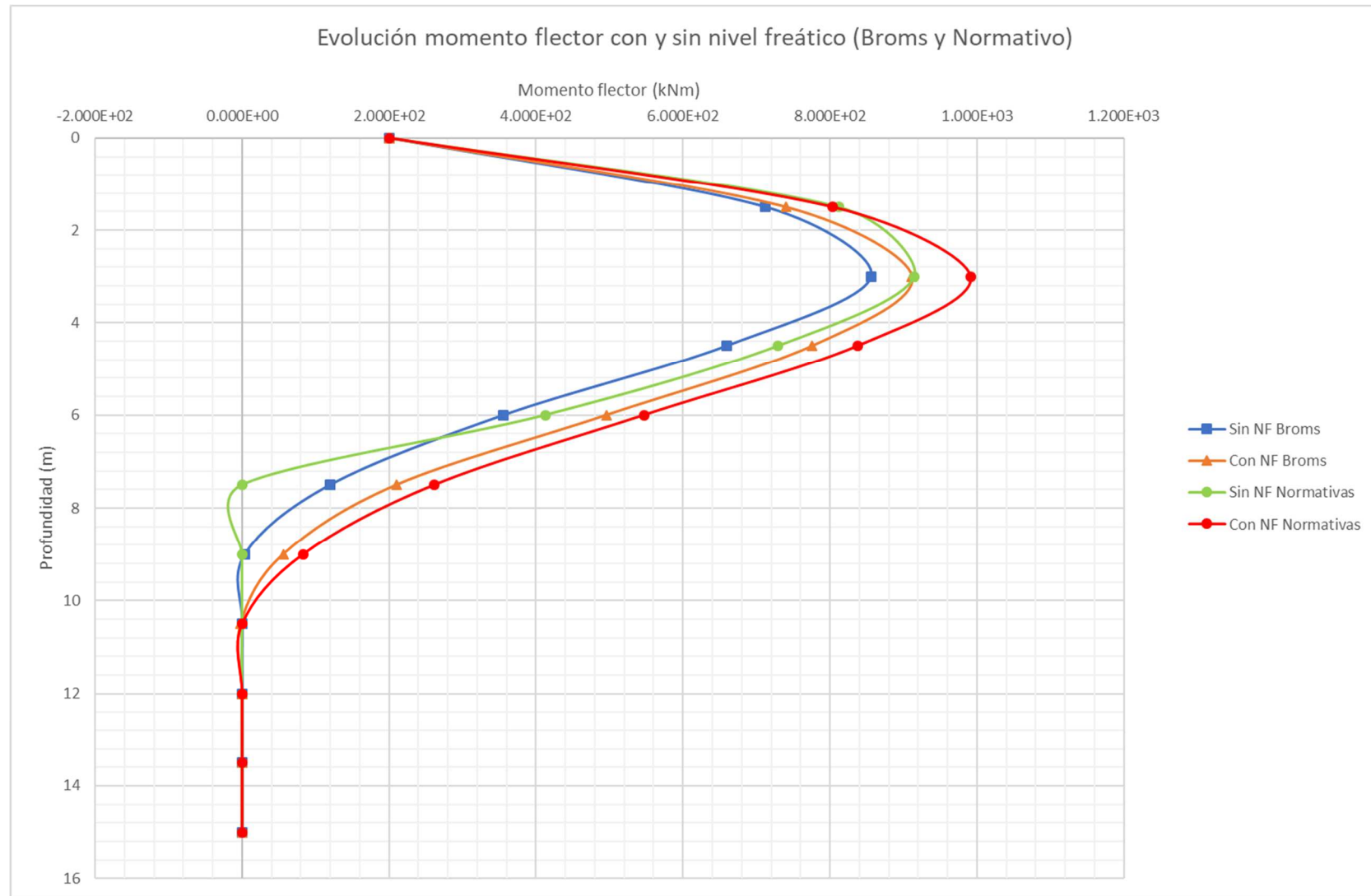


Figura 4.53. Evolución momento flector según existencia del NF (Broms y Normativas)

Esfuerzo cortante (Broms y Normativas)

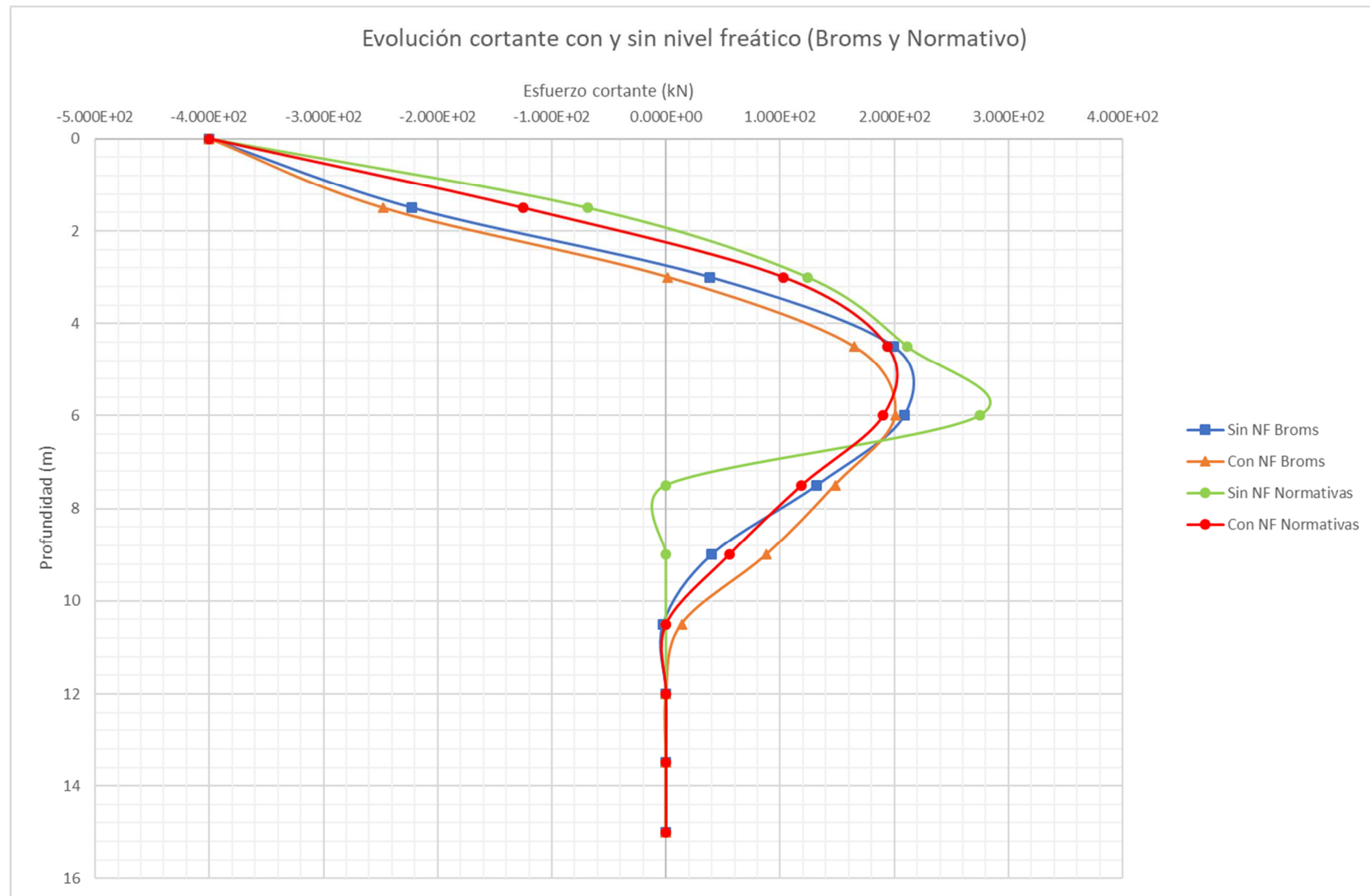


Figura 4.54. Evolución esfuerzo cortante según existencia del NF (Broms y Normativas con criterio del CTE)

Comentarios

Para el método de Broms y los normativos, la presencia del nivel freático tiene leves efectos en los resultados. El terreno se comporta como un terreno de menor compacidad ya que el peso específico de la ecuación (2.13) es el sumergido:

- **Desplazamiento:** Según la **figura 4.51** y para arena sumergida, el modelo normativo presenta los mayores desplazamientos en cabeza. El pilote se desplazará más en cabeza si lo enterramos en una arena sumergida que si lo hacemos en una arena donde el NF se encuentre a una profundidad tal que no se vea afectado el pilote por éste en ningún punto de su longitud. La diferencia entre los desplazamientos experimentados en terreno seco y sumergido es de, aproximadamente, 0.4cm en sendos modelos. Así mismo, ambos modelos tienden a reducir sus desplazamientos con el aumento de la profundidad.
- **Giro:** los valores del giro en la cabeza del pilote aumentan levemente con la presencia del nivel freático (v. **figura 4.52**). En el modelo de Broms, el giro tiende a disminuir con el aumento de la profundidad.
- **Momento flector:** En la **figura 4.53** se puede observar que los mayores momentos son debidos al modelo normativo y que, a cierta profundidad del terreno, estos esfuerzos tienden a anularse tanto para una arena sumergida como seca. La presencia del freático se traduce en un aumento del momento flector soportado: un pilote enterrado en una arena sumergida soporta un momento flector levemente superior que en un terreno seco.
- **Esfuerzo cortante:** En la **figura 4.54** se puede observar que se repite el comportamiento del **apartado 4.3.3:** en terreno seco, menor esfuerzo cortante para una misma profundidad. Los cortantes negativos, en ambos métodos, aumentan levemente con la presencia del NF y disminuyen con la profundidad. Por otro lado, los cortantes positivos alcanzan un valor máximo que se produce a mayor profundidad con la presencia del agua para el método analítico y en terreno seco para las normativas. En ambos métodos, la profundidad donde se alcanza el valor nulo de dicho esfuerzo aumenta para el caso del terreno sumergido. En otras palabras, en una arena sumergida el esfuerzo cortante se hará nulo a una profundidad mayor que si el pilote no estuviese afectado por la presencia del NF.

Resumen diferencias entre los métodos: Se observa que el método de Broms arroja menores desplazamientos en cabeza y momentos flectores que el método normativo para una misma situación de la arena y a la misma profundidad. Sin embargo, el comportamiento es contrario para los cortantes negativos: el método analítico proporciona mayores valores que el normativo. En cuanto a los valores máximos, tanto de momento flector como de cortante, es el método normativo el que proporciona valores máximos superiores para una misma situación del terreno. La diferencia en el máximo cortante positivo entre ambos métodos para una arena sumergida es nimia. Además, este valor es mayor en una arena seca que en una arena sumergida para ambas metodologías.

Podemos concluir, por tanto, que la presencia del freático es un parámetro de leve importancia en sendos modelos de análisis para el cálculo de los desplazamientos y de los esfuerzos cuando un pilote se encuentra bajo una carga lateral y un momento en cabeza.

5 MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS (RSPILE) Y ELEMENTOS FINITOS (PLAXIS 2D). CÁLCULO DE DESPLAZAMIENTOS Y ESFUERZOS DE UN PILOTE AISLADO CARGADO LATERALMENTE Y SU EVOLUCIÓN.

5.1 Introducción

En este quinto capítulo se procede a analizar los resultados proporcionados por los *softwares* RSPILE y PLAXIS 2D, como baluartes de los métodos numéricos, cuando se aplican cargas laterales a un pilote aislado en terrenos cohesivos y granulares. Para ello, se procederá a analizar cómo cambian esfuerzos y desplazamientos cuando se modifica alguno de los parámetros definidos en el apartado 1.2.

Debido a que los resultados proporcionados por el modelo de PLAXIS 2D utilizando el elemento finito *pilote embebido* difieren mucho del resto de resultados, la escala cambia y provoca que no se puedan apreciar con detalle la evolución de los desplazamientos y esfuerzos. En las gráficas que aparecen en este capítulo no se recoge este método; sin embargo, sí aparecerá en el **capítulo 6** junto con el resto de los métodos empleados.

5.2 Pilote enterrado en terreno homogéneo arcilloso

5.2.1 Influencia de la longitud del pilote para los métodos de cálculo de RSPILE Y PLAXIS 2D (Elemento *placa*).

Los parámetros del terreno (arcilla media) y del pilote se exponen a continuación según el método de cálculo en las **tablas 5.1 a 5.4**. En las **figuras 5.1 a 5.4** se muestran los resultados obtenidos de aplicar una fuerza lateral de 400kN y un momento flector de 200kNm en la cabeza del pilote según el modelo de RSPILE y de PLAXIS 2D Axilsimétrico.

Parámetros del terreno (arcilla media)	
Peso específico aparente γ [kN/m ³]	16
Peso específico saturado γ_{SAT} [kN/m ³]	19
Resistencia al corte sin drenaje C_u (kPa)	80
Deformación ϵ_{50}	0.01
Tipo de suelo	Soft Clay soil

Tabla 5.1. Parámetros del terreno (arcilla media) para RSPILE

Parámetros del terreno (arcilla media)	
Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb
Tipo de análisis	No drenado tipo B
Peso específico aparente γ [kN/m ³]	16
Peso específico saturado γ_{SAT} [kN/m ³]	19
Índice de poros e	0.5
Módulo de deformación E (kPa)	5000
Coefficiente de Poisson ν	0.35
Resistencia al corte sin drenaje C_u (kPa)	80

Tabla 5.2. Parámetros del terreno (arcilla media) para PLAXIS 2D

Parámetros del pilote (HA-45)	
Longitudes (m)	15 – 20 – 25 – 30
Tipo de pilote	Cilíndrico
Diámetro (m)	0.85
Tipo de material	Elástico
Módulo de Young E_P (kPa)	31928000

Tabla 5.3. Parámetros del pilote para RSPILE según longitud del pilote.

Parámetros del pilote (HA-45) (Elemento <i>placa</i>)	
Longitudes (m)	15 – 20 – 25 – 30
Diámetro (m)	0.85
Tipo de material	Elástico
Rigidez axial $E_P A_P$ [kN]	18.12 * E6
Rigidez a flexión $E_P I_P$ [kNm ²]	81.81 * E4
Peso de la placa w [kN/m ²]	7.65
Coefficiente de Poisson ν	0.2
Espesor de la placa equivalente d_{eq} [m]	0.74
Peso específico del material γ_p (kN/m ³)	25

Tabla 5.4. Parámetros del pilote para elemento *placa* (PLAXIS 2D) según longitud del pilote.

Desplazamiento lateral (RSPILE Y PLAXIS 2D)

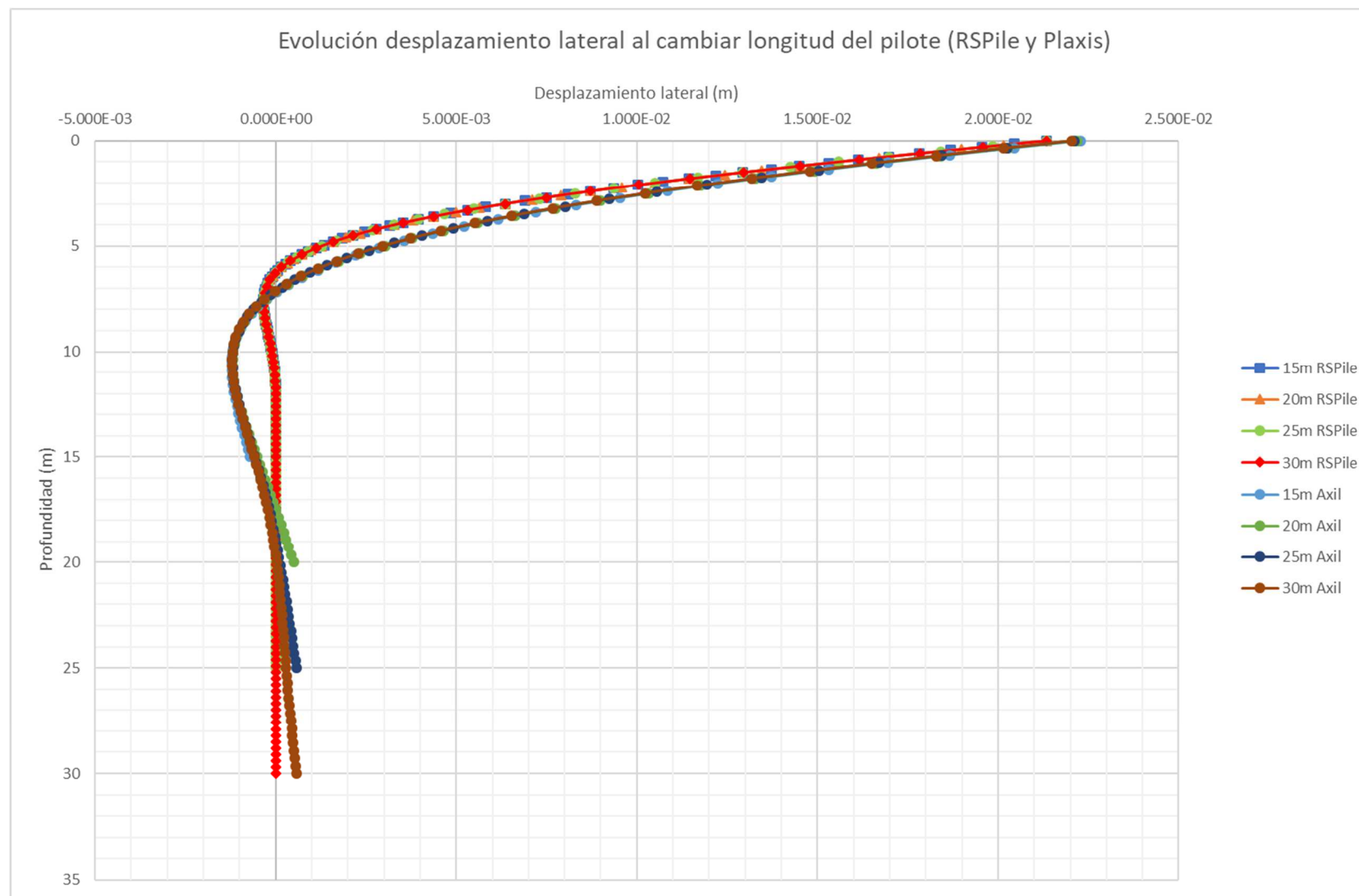


Figura 5.1. Evolución desplazamiento lateral al cambiar longitud del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Giro (RSPILE Y PLAXIS 2D)

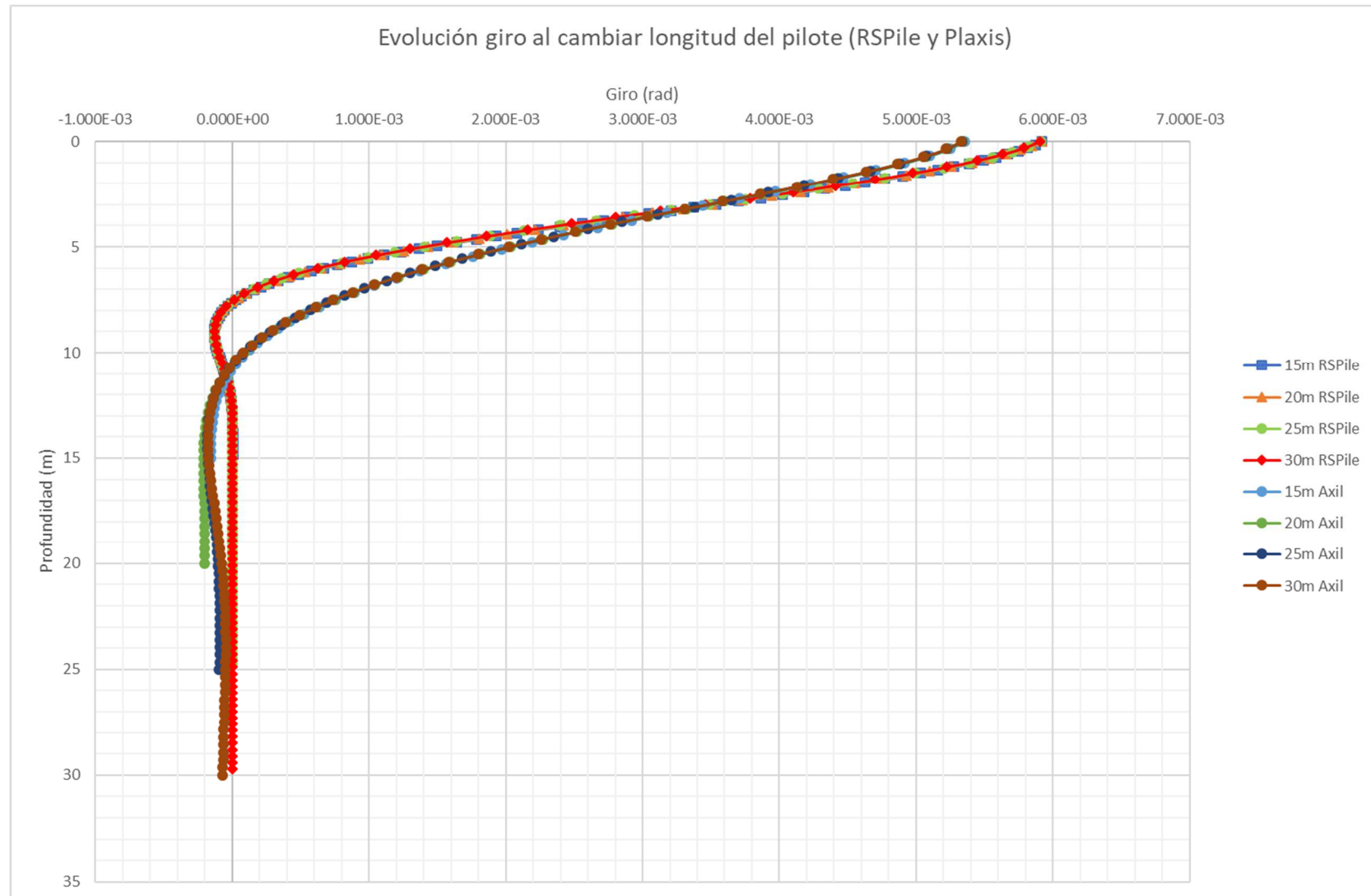


Figura 5.2. Evolución giro al cambiar longitud del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Momento flector (RSPILE Y PLAXIS 2D)

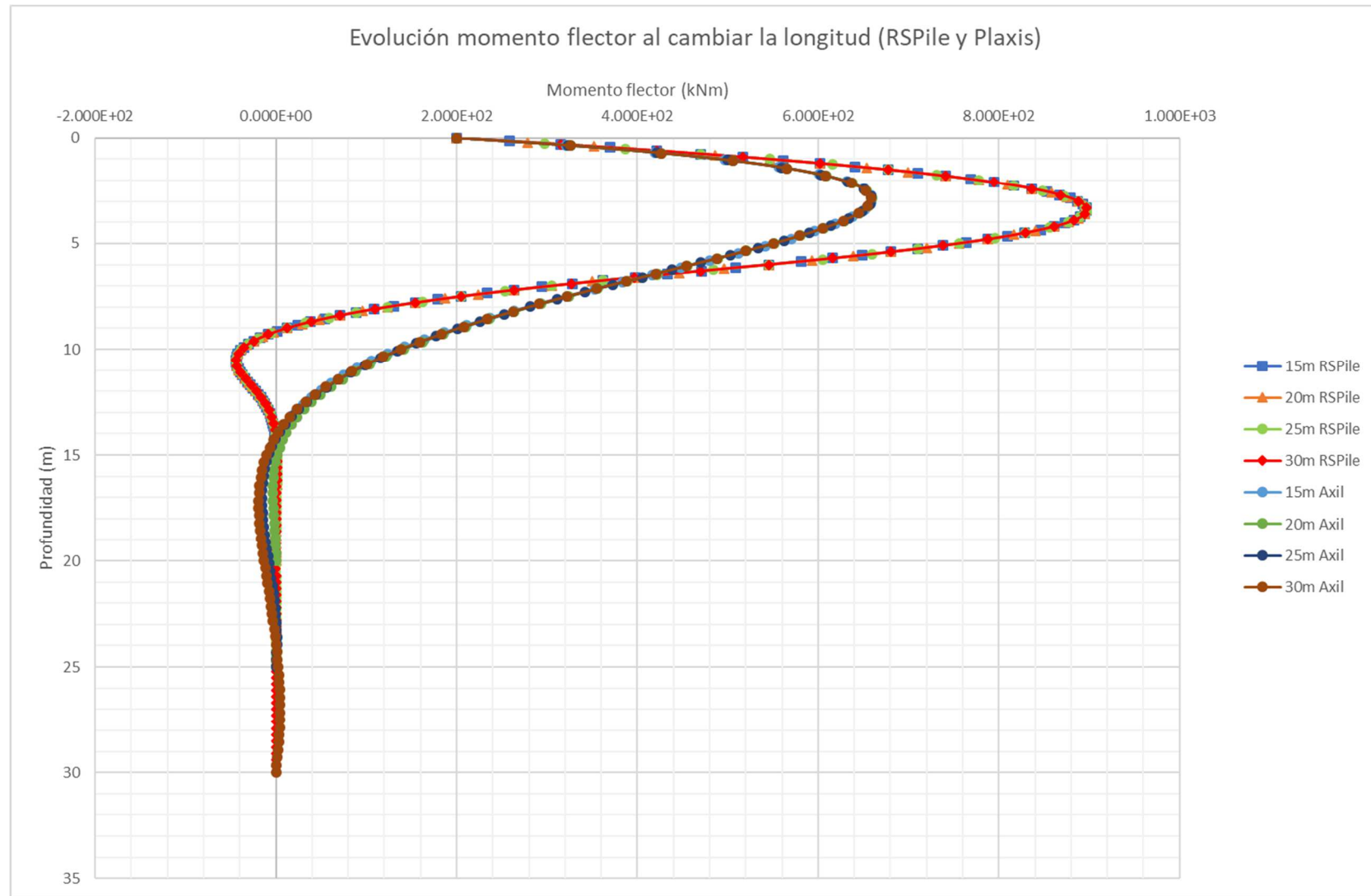


Figura 5.3. Evolución momento flector al cambiar longitud del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Esfuerzo cortante (RSPILE Y PLAXIS 2D)

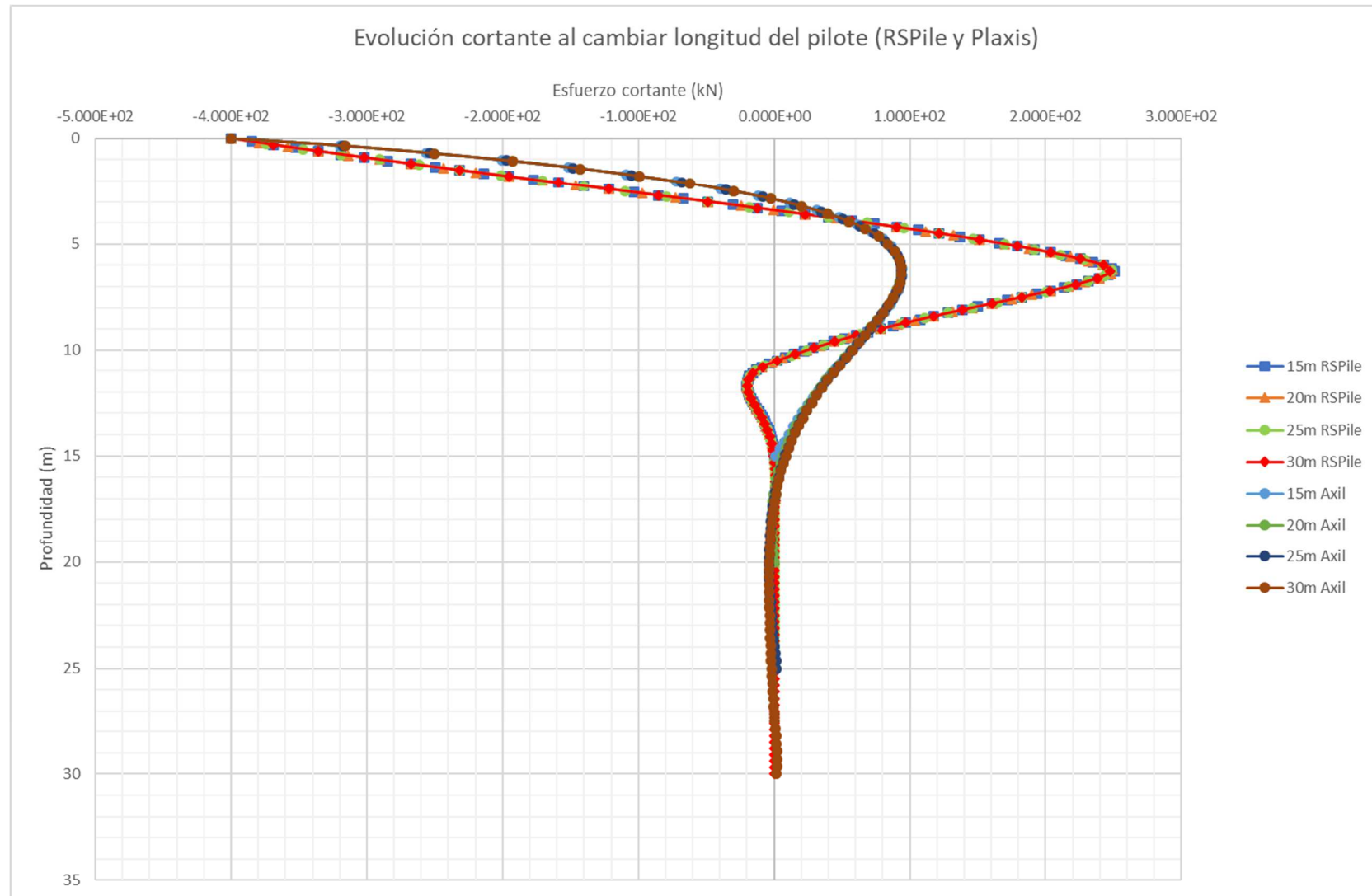


Figura 5.4. Evolución esfuerzo cortante al cambiar longitud del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Comentarios

A partir de las **figuras 5.1 a 5.4** y para los modelos del RSPILE y del PLAXIS 2D en terrenos arcillosos, se pueden hacer los siguientes comentarios respecto al cambio de la longitud del pilote:

- **Desplazamiento lateral (RSPILE):** Aunque no se pueda observar con claridad en la **figura 5.1**, a medida que la longitud del pilote aumenta, los desplazamientos se reducen. Éstos son máximos en cabeza y mínimos o nulos a profundidades del entorno de los 10m. En cabeza y hasta los 10m de profundidad, la longitud del pilote no afecta al comportamiento del mismo. El desplazamiento de la cabeza del pilote para el caso de tener una longitud de 15m no difiere del experimentado por un pilote de 30m de largo. La diferencia entre estos dos casos es del orden de la centésima de milímetro, algo totalmente despreciable.
- **Desplazamiento lateral (PLAXIS 2D):** En este modelo, la longitud sí tiene una mayor influencia en el cálculo de los desplazamientos laterales, pero la diferencia entre el desplazamiento del pilote de 15m y el de 30m es del orden de la décima de milímetro.
- **Giros:** Se observa en la **figura 5.2** que con los giros ocurre algo similar que con los desplazamientos: el aumento de la longitud del pilote no provoca un decrecimiento considerable del giro. Para ambos métodos, el giro tiende a disminuir de valor y a cambiar de signo a medida que aumenta la profundidad.
- **Momentos flectores:** Se observa en la **figura 5.3** que el modelo de RSPILE presenta una envolvente con valores mayores que el modelo de PLAXIS 2D para profundidades menores a los 6m. El máximo momento flector se mueve entre los 3m-4m de profundidad del pilote. En sendos modelos (RSPILE y PLAXIS 2D), los momentos flectores tienden a anularse para profundidades mayores a los 15m.
- **Esfuerzos cortantes:** Se puede observar en la **figura 5.4** que el modelo de RSPILE presenta una envolvente con valores mayores que el modelo de PLAXIS 2D para profundidades menores a los 9m. El máximo esfuerzo cortante positivo se mueve entre los 6m-7m de profundidad del pilote. En sendos modelos (RSPILE y PLAXIS 2D), los cortantes tienden a anularse para profundidades mayores a los 15m.

Resumen diferencias entre los métodos: El modelo del RSPILE proporciona menores desplazamientos laterales en cabeza que el PLAXIS 2D; sin embargo, en los giros, es el modelo de PLAXIS 2D el que proporciona menores giros en cabeza. En los esfuerzos existen tramos donde el RSPILE proporciona valores superiores para una misma profundidad y viceversa. En cuanto a los valores máximos, tanto de momento flector como de cortante, es el modelo del RSPILE el que proporciona valores máximos superiores.

Podemos concluir, por tanto, que en terrenos arcillosos la influencia de la longitud es irrelevante para ambos modelos numéricos en el cálculo de desplazamientos y esfuerzos cuando un pilote se ve sometido a una carga lateral y a un momento en cabeza.

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

5.2.2 Influencia del diámetro del pilote para los métodos de cálculo de RSPILE Y PLAXIS 2D (Elemento *placa*).

Los parámetros del terreno (arcilla media) son los mismos que los de la **tabla 5.1-5.2** y los del pilote se exponen a continuación según el método de cálculo en las **tablas 5.5 y 5.6**. En las **figuras 5.5 a 5.8** se muestran los resultados obtenidos de aplicar una fuerza lateral de 400kN y un momento flector de 200kNm en la cabeza del pilote según el modelo de RSPILE y de PLAXIS 2D Axilsimétrico.

Parámetros del pilote (HA-45)	
Longitud (m)	25
Tipo de pilote	Cilíndrico
Diámetros (m)	0.85 – 1.00 – 1.25 – 1.50
Tipo de material	Elástico
Módulo de Young E_p (kPa)	31928000

Tabla 5.5. Parámetros del pilote para RSPILE según diámetro del pilote.

Parámetros del pilote (HA-45) (Elemento <i>placa</i>)				
Longitud (m)	25			
Diámetros (m)	0.85	1.00	1.25	1.50
Tipo de material	Elástico			
Rigidez axial $E_p A_p$ [kN]	18.12*E6	25.08*E6	39.18*E6	56.42*E6
Rigidez a flexión $E_p I_p$ [kNm ²]	81.81*E4	15.67*E5	38.26*E5	79.34*E5
Peso de la placa w [kN/m ²]	7.65	9	11.25	13.50
Coefficiente de Poisson ν	0.2			
Espesor de la placa equivalente d_{eq} [m]	0.74	0.866	1.083	1.299
Peso específico del material γ_p (kN/m ³)	25			

Tabla 5.6. Parámetros del pilote para elemento *placa* (PLAXIS 2D) según diámetro de éste.

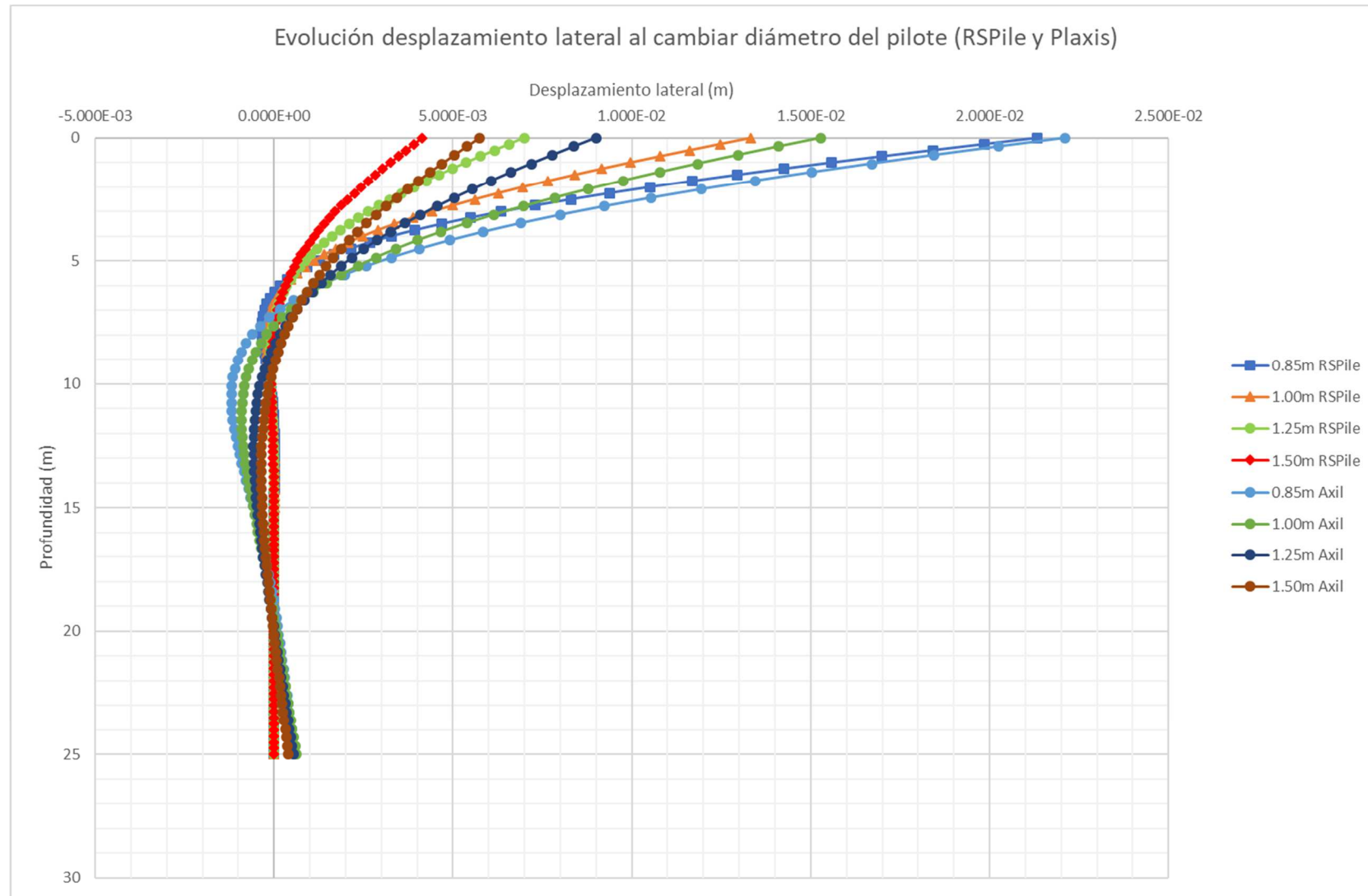
Desplazamiento lateral (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Figura 5.5. Evolución desplazamiento lateral al cambiar diámetro del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Giro (RSPILE Y PLAXIS 2D)

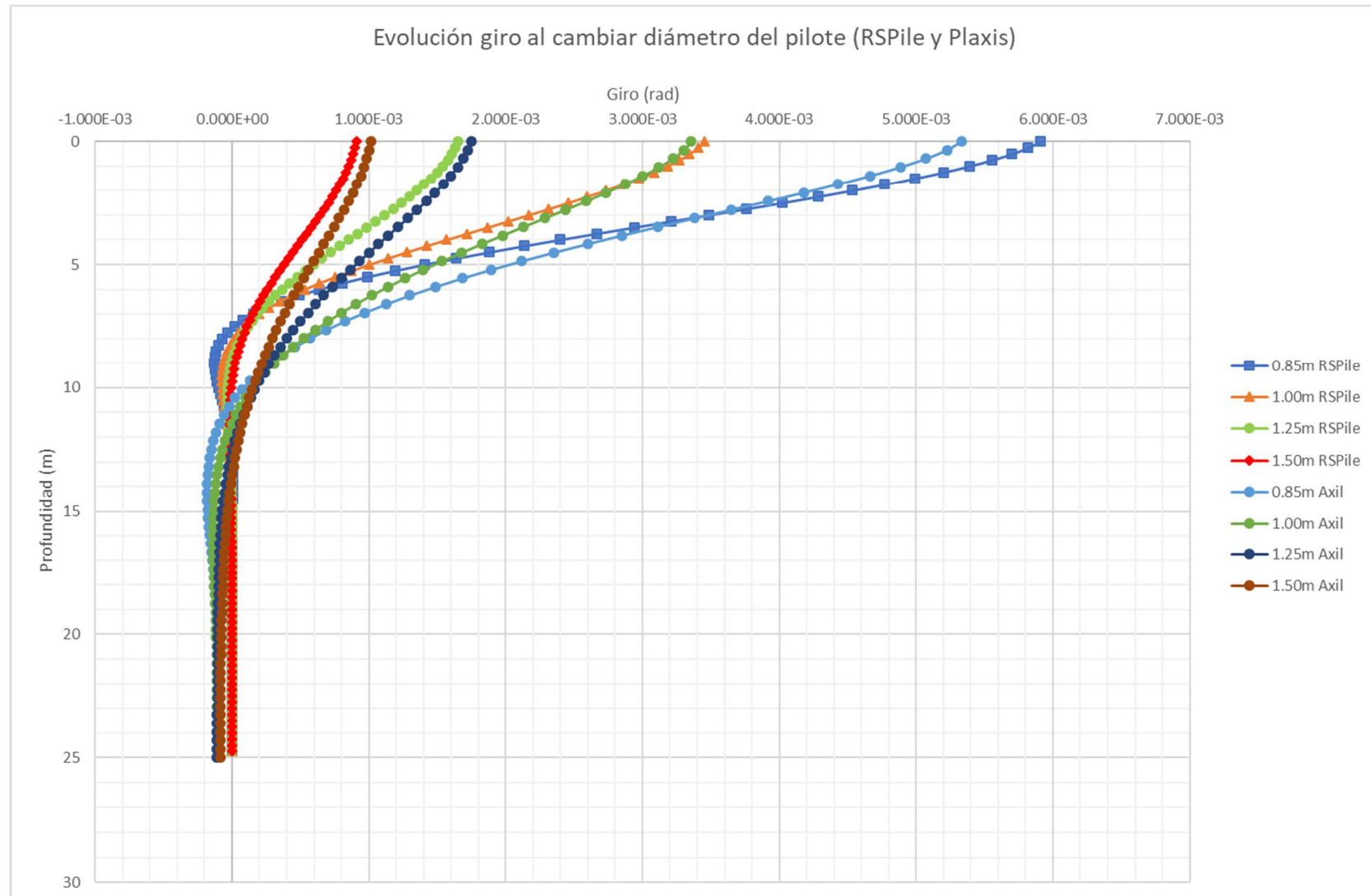


Figura 5.6. Evolución giro al cambiar diámetro del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Momento flector (RSPILE Y PLAXIS 2D)

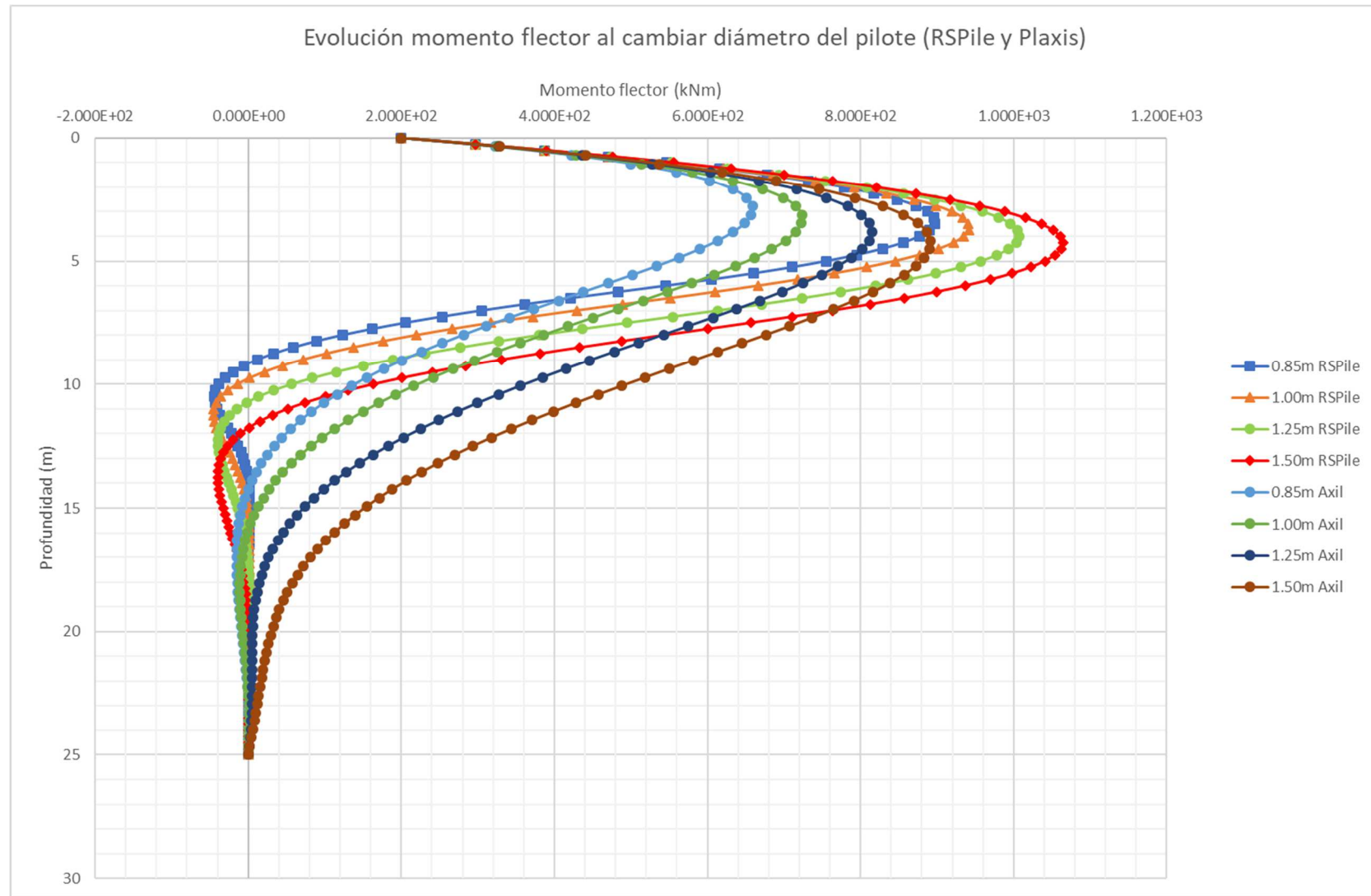


Figura 5.7. Evolución momento flector al cambiar diámetro del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Esfuerzo cortante (RSPILE Y PLAXIS 2D)

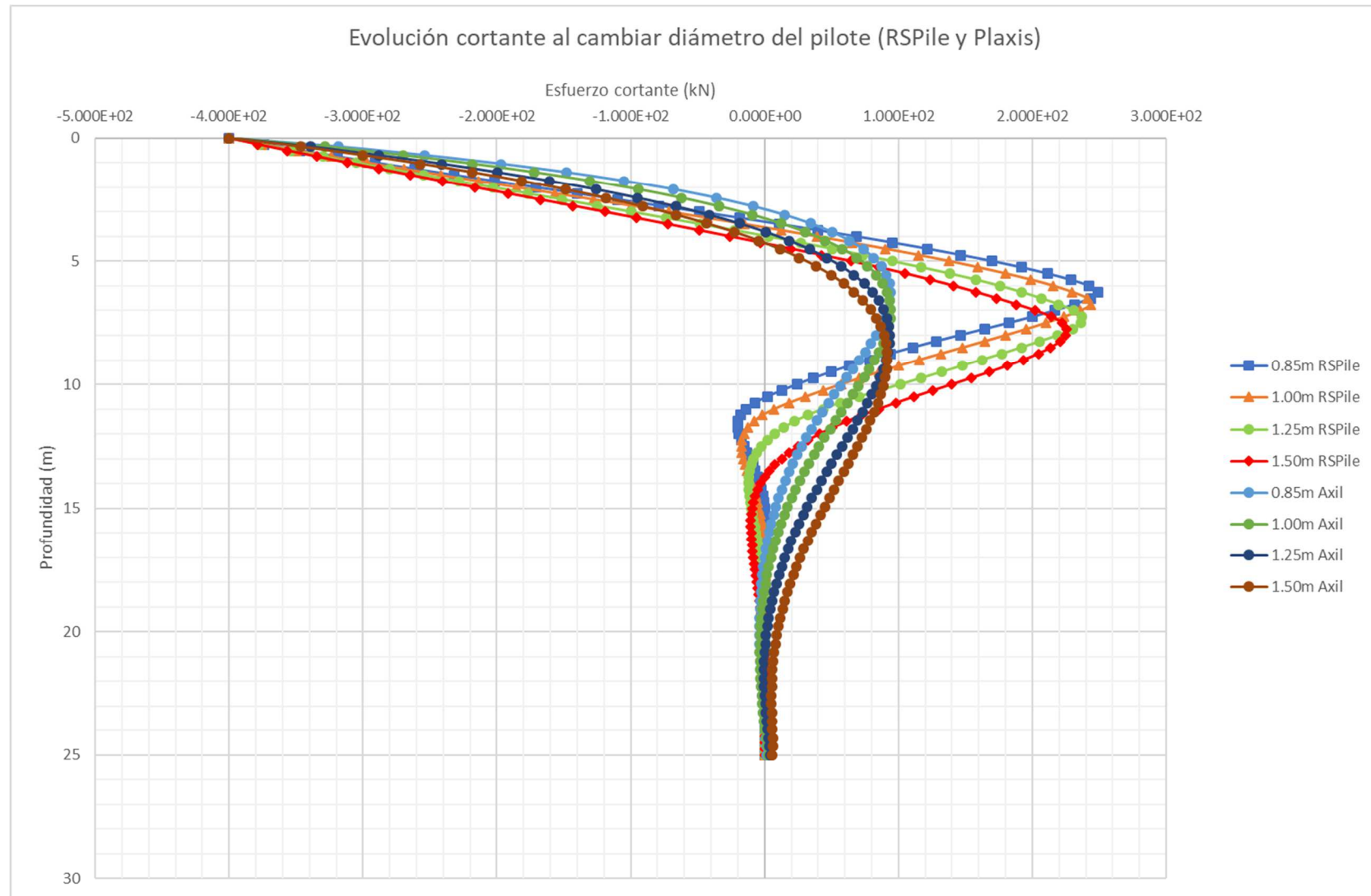


Figura 5.8. Evolución esfuerzo cortante al cambiar diámetro del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Comentarios

Para los modelos del RSPILE y del PLAXIS 2D en terrenos arcillosos, cambiar el diámetro del pilote sí tiene un mayor efecto en los resultados:

- **Desplazamiento:** En la **figura 5.5** se observa que, al disminuir el diámetro, los mayores desplazamientos en la cabeza del pilote corresponden al modelo de PLAXIS 2D. En sendos modelos, para profundidades del entorno de los 6-7m, se aprecia un cambio en la dirección de los desplazamientos. Para el modelo de RSPILE, los desplazamientos son nulos a profundidades del entorno de los 10m. El desplazamiento de la cabeza del pilote para el caso de tener un diámetro de 0.85m es superior al experimentado por un pilote de 1.50m de diámetro en ambos modelos. La diferencia entre estos dos casos es de más de 1.5cm en sendos modelos.
- **Giro:** los valores del giro en la cabeza del pilote descienden de manera considerable con el aumento del diámetro (v. **figura 5.6**). El pilote de 0.85m gira seis veces más que el pilote de 1.50m en cabeza según el modelo de RSPILE y cinco según el de PLAXIS 2D. Para ambos métodos, el giro tiende a disminuir de valor y a cambiar de signo a medida que aumenta la profundidad.
- **Momento flector:** Se puede ver en la **figura 5.7** que los mayores momentos son debidos al modelo de RSPILE. El aumento del diámetro se traduce en un aumento del momento flector soportado: el pilote de 1.50m soporta un momento flector mayor que el pilote de 0.85m. Este aumento es más acusado en el modelo del PLAXIS 2D que en el RSPILE, siendo la diferencia en el primero de 230 kNm y de 165 kNm en el segundo. A su vez, este valor máximo se produce a mayor profundidad con el aumento del área del pilote. Se observa además que los momentos tienden a disminuir al aumentar la profundidad a partir de profundidades del entorno de los 6-8m.
- **Esfuerzo cortante:** Se aprecia en la **figura 5.8** que los cortantes negativos en ambos modelos aumentan con el aumento del diámetro del pilote y disminuyen con la profundidad. En el caso de los cortantes positivos, el comportamiento es al contrario: a mayor diámetro del pilote, menor cortante positivo. Centrándonos en los valores positivos del esfuerzo cortante, en sendos modelos se alcanza un valor máximo que se produce a mayor profundidad con el aumento del diámetro. En el modelo RSPILE este valor máximo disminuye con el aumento de área, mientras que en el modelo del PLAXIS 2D permanece constante.

Resumen diferencias entre los métodos: Los desplazamientos son menores en cabeza en el modelo del RSPILE para todos los casos; mientras que los esfuerzos máximos son mayores para este modelo. Sin embargo, ocurre que en la distribución de esfuerzos se da el caso contrario: en un mayor rango de profundidades, el esfuerzo considerado es superior en el modelo del PLAXIS 2D que en el modelo del RSPILE.

Podemos concluir, por tanto, que el diámetro sí es un parámetro determinante en ambos modelos de análisis para el cálculo de los desplazamientos y esfuerzos en un terreno arcilloso cuando un pilote está sometido a una carga lateral y un momento en la cabeza.

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

5.2.3 Influencia de la consistencia del terreno para los métodos de cálculo de RSPILE Y PLAXIS 2D (Elemento *placa*).

Los parámetros del terreno y del pilote se exponen a continuación según el método de cálculo en las **tablas 5.7 a 5.10**. En las **figuras 5.9 a 5.12** se muestran los resultados obtenidos de aplicar una fuerza lateral de 400kN y un momento flector de 200kNm en la cabeza del pilote según el modelo de RSPILE y de PLAXIS 2D Axilsimétrico.

Parámetros del terreno			
Consistencia del terreno	Blanda	Media	Firme
Peso específico aparente γ [kN/m ³]	16	16	21
Peso específico saturado γ_{SAT} [kN/m ³]	19	19	22
Valor de C_u (kPa)	40	80	100
Deformación ϵ_{50}	0.02	0.01	0.005
Tipo de suelo	Soft Clay soil		

Tabla 5.7. Parámetros del terreno para RSPILE según consistencia del terreno.

Parámetros del terreno			
Consistencia del terreno	Blanda	Media	Firme
Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb		
Tipo de análisis	No drenado tipo B		
Peso específico aparente γ [kN/m ³]	16	16	21
Peso específico saturado γ_{SAT} [kN/m ³]	19	19	22
Índice de poros e	0.70	0.50	0.35
Módulo de deformación E (kPa)	1500	5000	10000
Coefficiente de Poisson ν	0.40	0.35	0.30
Resistencia al corte sin drenaje C_u (kPa)	40	80	100

Tabla 5.8. Parámetros del terreno para PLAXIS 2D según consistencia del terreno.

Parámetros del pilote (HA-45)	
Longitud (m)	25
Tipo de pilote	Cilíndrico
Diámetro (m)	0.85
Tipo de material	Elástico
Módulo de Young E_P (kPa)	31928000

Tabla 5.9. Parámetros del pilote para RSPILE según consistencia del terreno.

Parámetros del pilote (HA-45) (Elemento Placa)			
Longitud [m]	25		
Módulo de deformación E_P [kPa]	31928000		
Peso específico del material γ_p [kN/m ³]	25		
Tipo de material	Elástico		
Diámetro [m]	0.85		
Consistencia del terreno	Blanda	Media	Firme
Rigidez axial $E_P A_P$ [kN]	18.12 * E6		
Rigidez a flexión $E_P I_P$ [kNm ²]	81.81 * E4		
Peso de la placa w [kN/m ²]	7.65	7.65	3.40
Espesor de la placa equivalente d_{eq} [m]	0.74		
Coefficiente de Poisson ν	0.2		

Tabla 5.10. Parámetros del pilote para elemento *placa* (PLAXIS 2D) según consistencia del terreno

Desplazamiento lateral (RSPILE Y PLAXIS 2D)

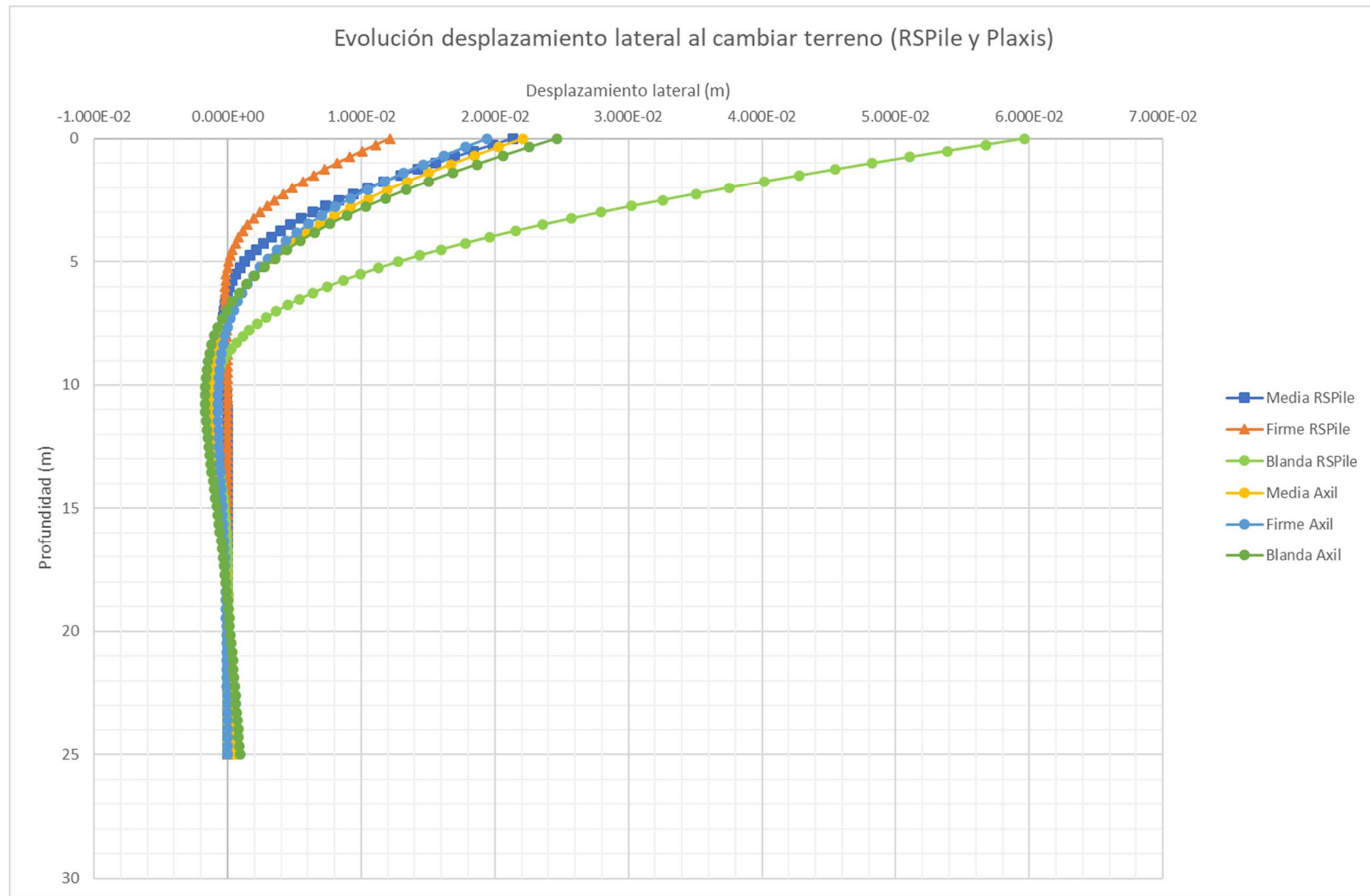


Figura 5.9. Evolución desplazamiento lateral al cambiar consistencia del terreno (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Giro (RSPILE Y PLAXIS 2D)

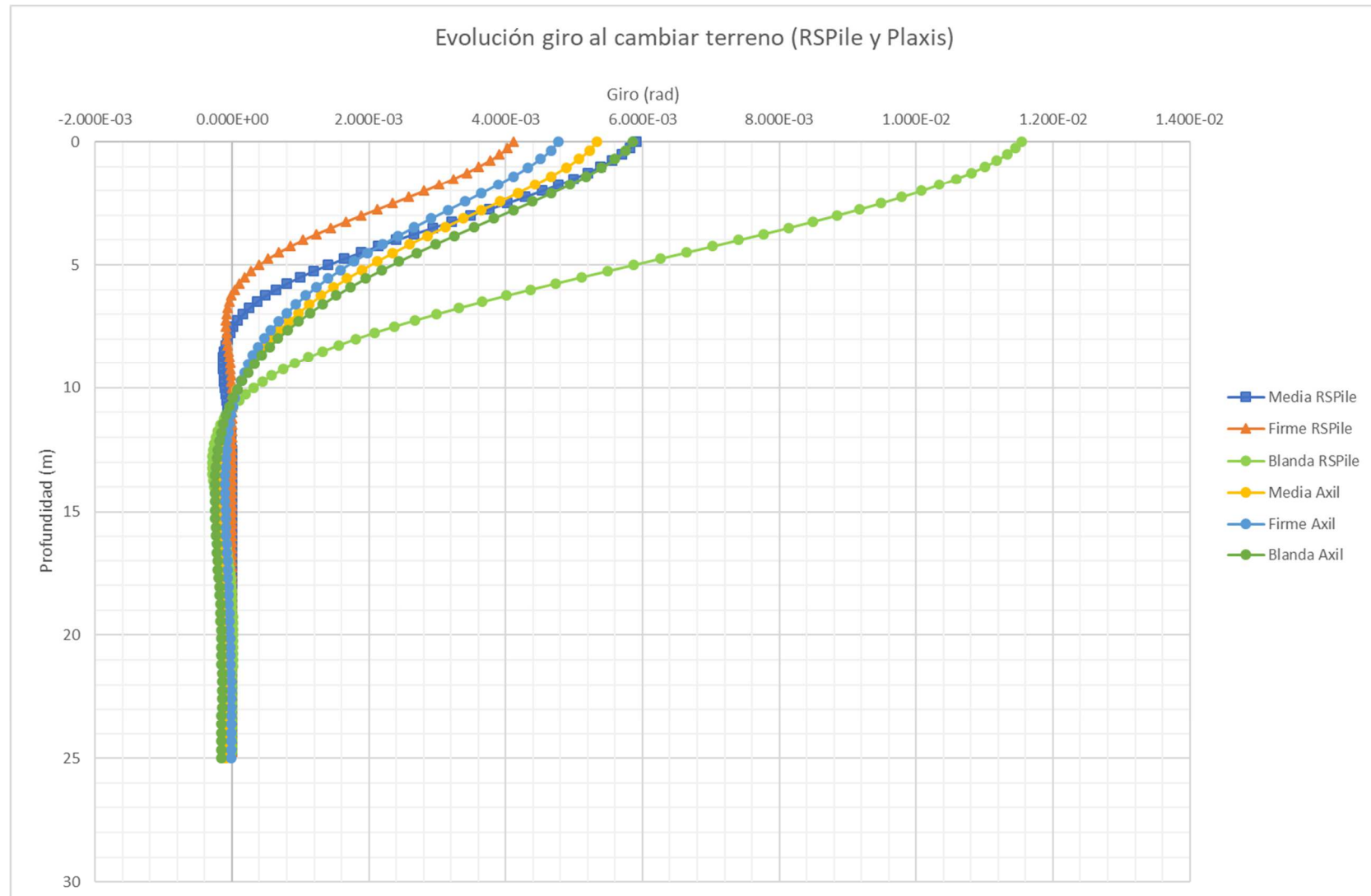


Figura 5.10. Evolución giro al cambiar consistencia del terreno (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Momento flector (RSPILE Y PLAXIS 2D)

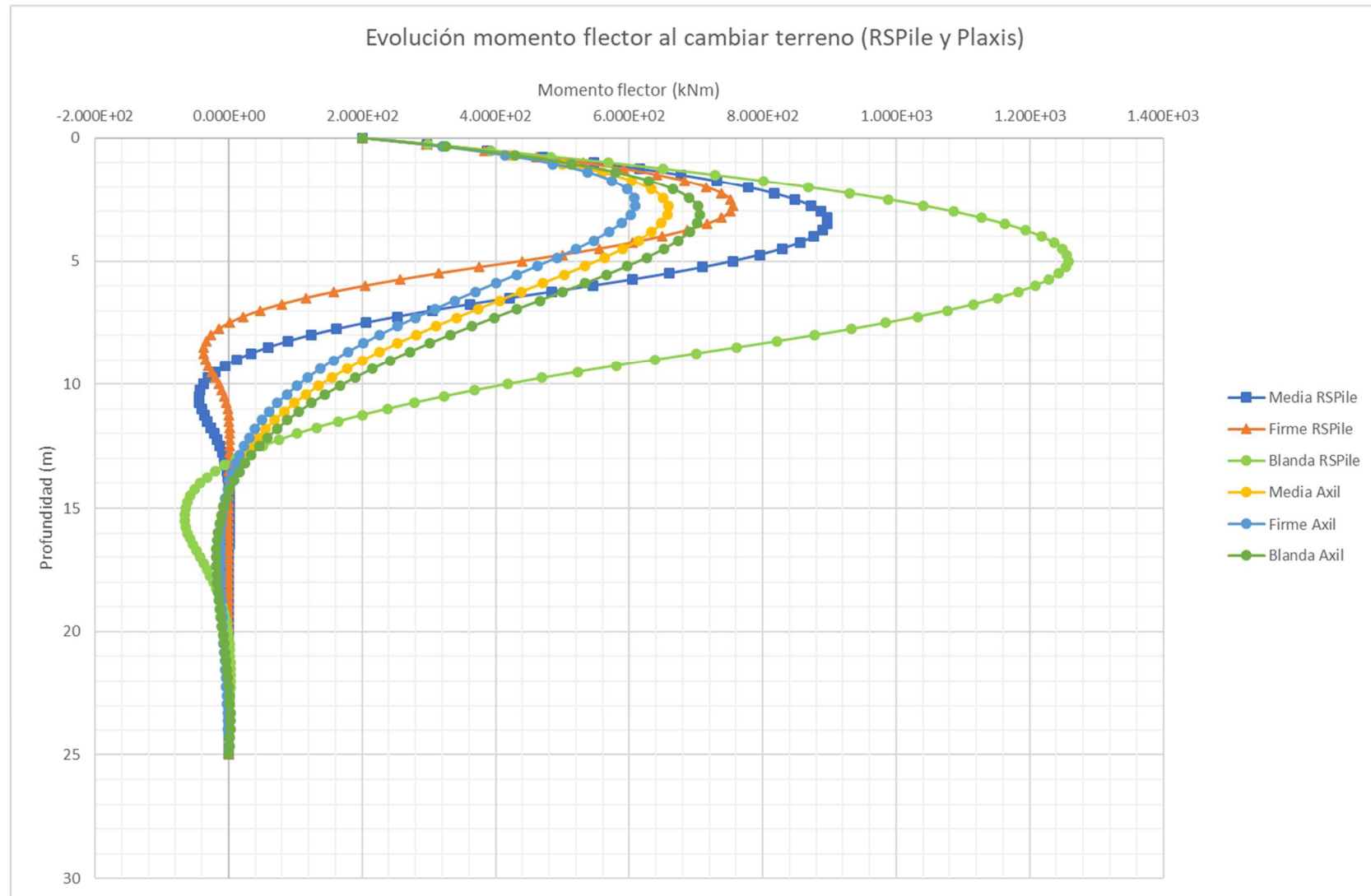


Figura 5.11. Evolución momento flector al cambiar consistencia del terreno (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Esfuerzo cortante (RSPILE Y PLAXIS 2D)

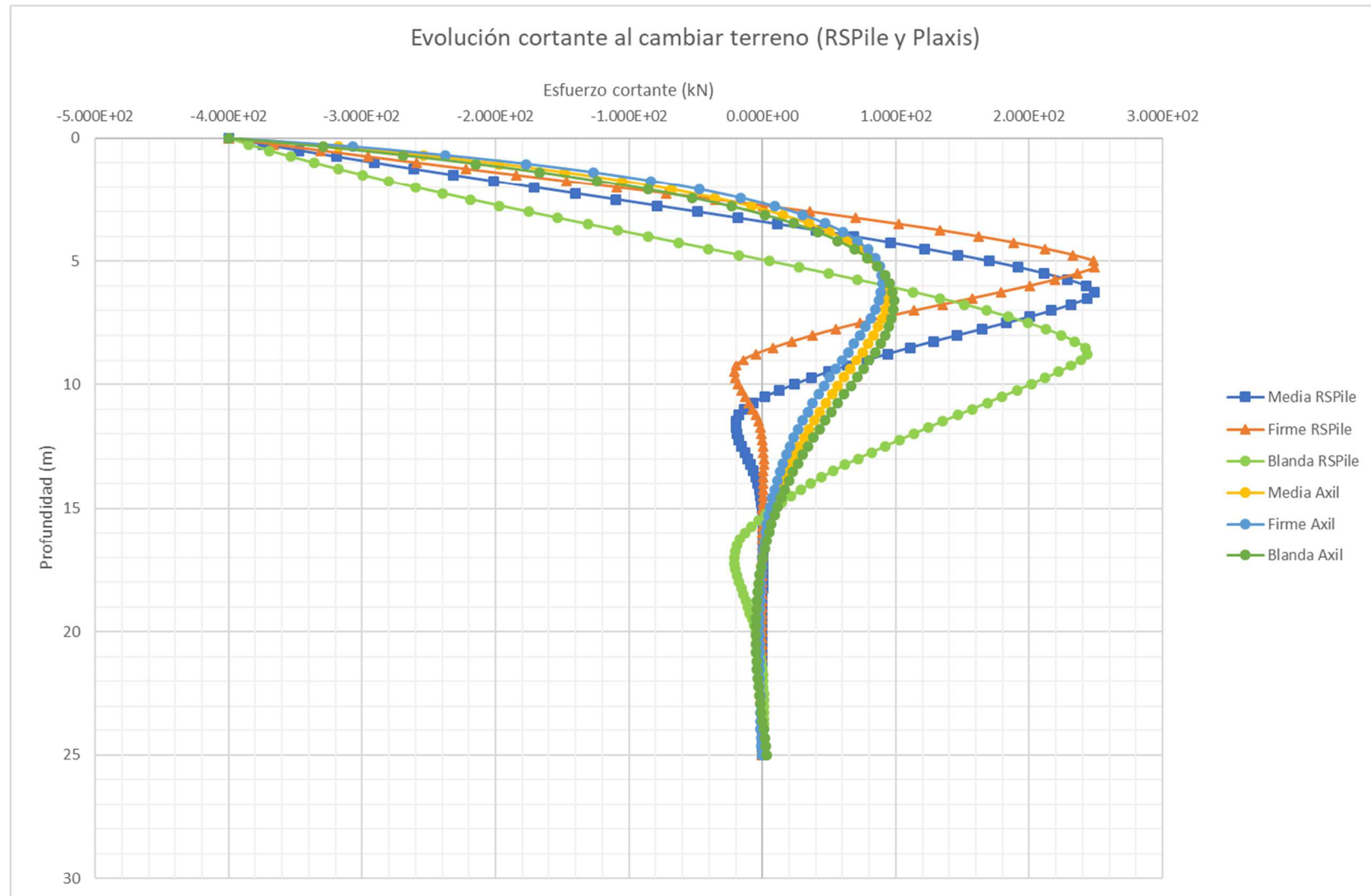


Figura 5.12. Evolución esfuerzo cortante al cambiar consistencia del terreno (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Comentarios

A partir de las **figuras 5.9 a 5.12** y para los modelos del RSPILE y del PLAXIS 2D en terrenos arcillosos, se pueden hacer los siguientes comentarios respecto al cambio de la consistencia de la arcilla:

- **Desplazamiento:** Según la **figura 5.9** y para arcilla blanda, el modelo RSPILE presenta los mayores desplazamientos en cabeza. El pilote se desplazará más a lo largo de todo el fuste si lo enterramos en una arcilla blanda que si lo hacemos en una arcilla firme. Mientras que la diferencia entre estos dos casos es de, aproximadamente, 5cm en cabeza para el modelo del RSPILE, esta diferencia es de sólo 0.5cm en el modelo de PLAXIS 2D. Para cualquier consistencia del terreno, ambos modelos tienden a reducir sus desplazamientos con el aumento de profundidad.
- **Giro:** Los valores del giro a lo largo del fuste descienden con el aumento de la consistencia (v. **figura 5.10**). En arcilla blanda, el pilote gira en cabeza, de media, el doble que si estuviera en una arcilla firme. Para ambos métodos, el giro tiende a disminuir de valor y a cambiar de signo a medida que aumenta la profundidad.
- **Momento flector:** En la **figura 5.11** puede verse que los mayores momentos son debidos al modelo de RSPILE y que, a cierta profundidad del terreno (3-5m), estos esfuerzos tienden a disminuir hasta anularse para cualquier consistencia del terreno. El aumento de la consistencia del terreno se traduce en un descenso del momento flector soportado: un pilote enterrado en una arcilla blanda soporta un momento flector mayor que en un terreno firme. ¿A qué se debe esto? En la interfaz terreno blando-pilote, la distribución de tensiones es casi uniforme y por tanto menor la curvatura. A menor curvatura, mayor serán los momentos en dichos puntos. Se puede llegar a producir un aumento de 500 kNm en una arcilla blanda (RSPILE).
- **Esfuerzo cortante:** En la **figura 5.12** se puede observar que se repite el comportamiento de los apartados anteriores: a mejor terreno, menor esfuerzo cortante para una misma profundidad. Los cortantes negativos, en ambos métodos, aumentan al disminuir la consistencia del terreno y disminuyen con la profundidad. Por otro lado, en los cortantes positivos, existen tramos donde el cortante es mayor en una arcilla firme que en una arcilla blanda. Centrándonos en los valores positivos del esfuerzo cortante, en sendos modelos se alcanza un valor máximo, relativamente constante, que se produce a menor profundidad con el aumento de la consistencia del terreno. También a destacar que, en ambos modelos, la profundidad donde se alcanza el valor nulo de dicho esfuerzo aumenta con el descenso de la consistencia de la arcilla. En otras palabras, en una arcilla blanda el esfuerzo cortante se hará nulo a una profundidad mayor que si estuviese el pilote enterrado en una arcilla firme.

Resumen diferencias entre los métodos: Para el modelo del RSPILE, la consistencia del terreno juega un papel fundamental ya que depende directamente de ésta a través de la deformación ϵ_{50} . En el modelo del PLAXIS 2D, el papel de la consistencia es mucho menos importante. Fruto de esta importancia se observa, por ejemplo, en los máximos momentos: la diferencia entre el máximo momento medido en arcilla blanda y firme es mucho mayor en el modelo RSPILE que en modelo de PLAXIS 2D.

Podemos concluir, por tanto, que el tipo de terreno es un parámetro determinante en el modelo del RSPILE para el cálculo de los desplazamientos y de los esfuerzos cuando un pilote se encuentra sometido a una carga lateral y a un momento en cabeza. Para el modelo del PLAXIS 2D, su contribución es algo superior a la de la longitud, pero no se equipara al diámetro (parámetro con mayor influencia en dicho método).

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

5.2.4 Influencia del tipo de material del pilote para los métodos de cálculo de RSPILE Y PLAXIS 2D (Elemento *placa*).

Los parámetros del terreno (arcilla media) son los mismos que los de la **tabla 5.1-5.2** y los del pilote se exponen a continuación según el método de cálculo en las **tablas 5.11 y 5.12**. En las **figuras 5.13 a 5.16** se muestran los resultados obtenidos de aplicar una fuerza lateral de 400kN y un momento flector de 200kNm en la cabeza del pilote según el modelo de RSPILE y de PLAXIS 2D Axilsimétrico.

Parámetros del pilote		
Longitud (m)	25	
Tipo de pilote	Cilíndrico	
Diámetro (m)	0.85	
Material	Hormigón HA-45	Acero
Módulo de Young E_P (kPa)	31928000	210*E6

Tabla 5.11. Parámetros del pilote para RSPILE según material: HA-45 o Acero

Parámetros del pilote (Elemento <i>Placa</i>)		
Longitud [m]	25	
Material	Hormigón HA-45	Acero
Módulo de deformación E_P (kPa)	31928000	210*E6
Peso específico del material γ_p (kN/m ³)	25	76.93
Tipo de material	Elástico	
Diámetro (m)	0.85	
Consistencia del terreno	Media	
Rigidez axial $E_P A_P$ [kN]	18.12*E6	119.2*E6
Rigidez a flexión $E_P I_P$ [kNm ²]	81.81*E4	53.81*E5
Peso de la placa w [kN/m ²]	7.65	51.79
Espesor de la placa equivalente d_{eq} [m]	0.74	0.74
Coefficiente de Poisson ν	0.2	0.3

Tabla 5.12. Parámetros del pilote para elemento *placa* (PLAXIS 2D) según material: HA-45 o acero.

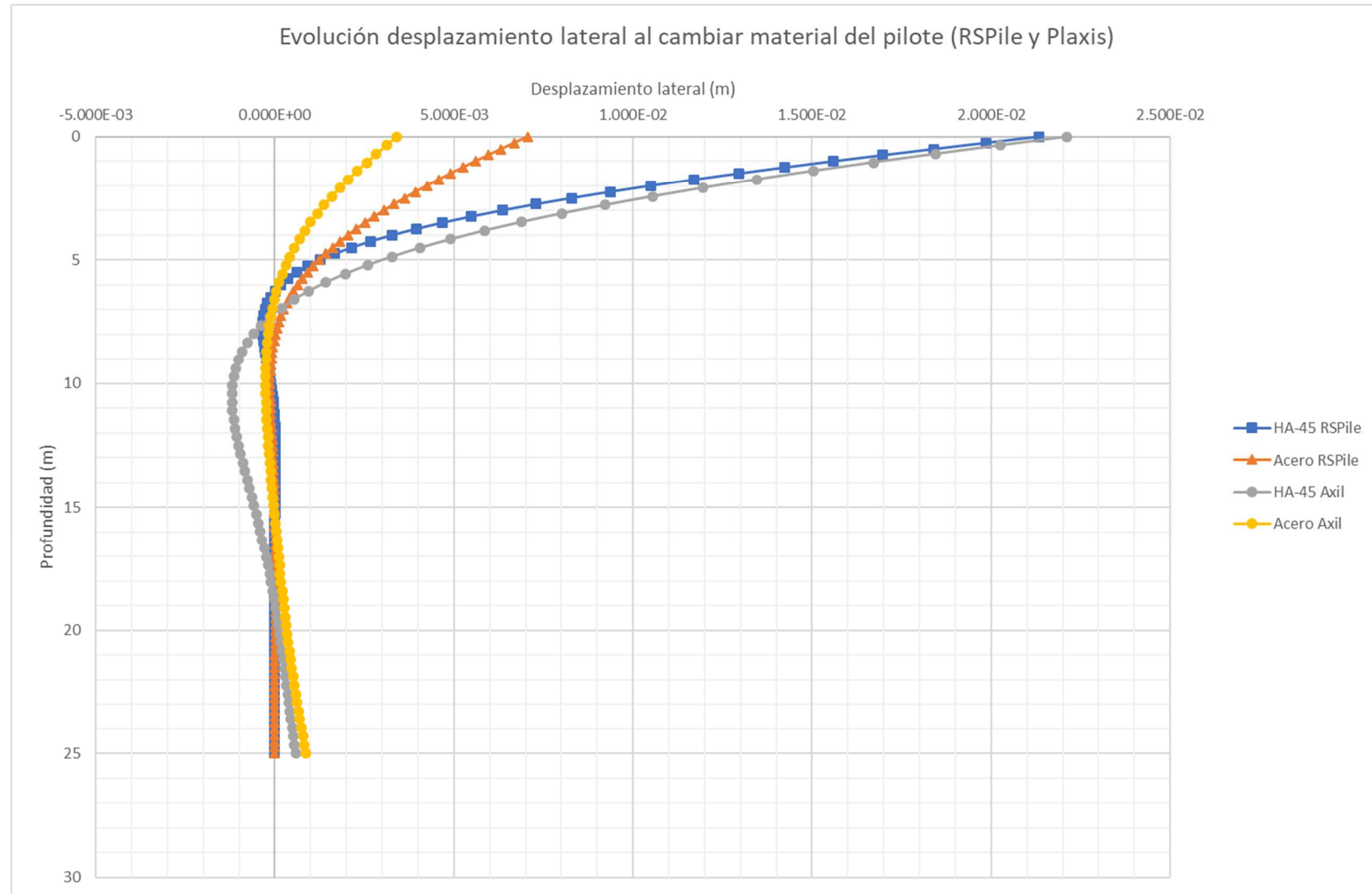
Desplazamiento lateral (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Figura 5.13. Evolución desplazamiento lateral al cambiar material del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Giro (RSPILE Y PLAXIS 2D)

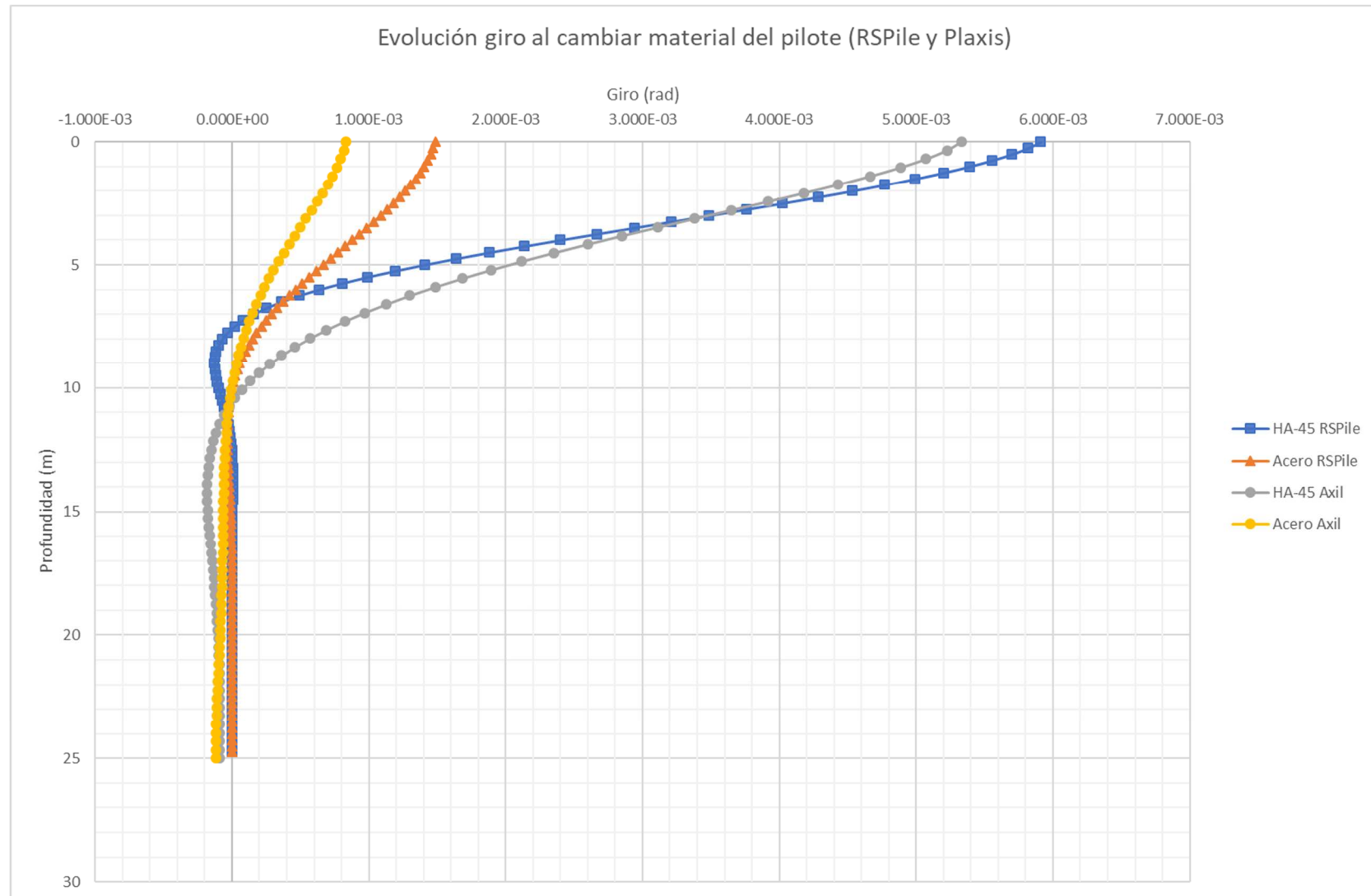


Figura 5.14. Evolución giro al cambiar material del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Momento flector (RSPILE Y PLAXIS 2D)

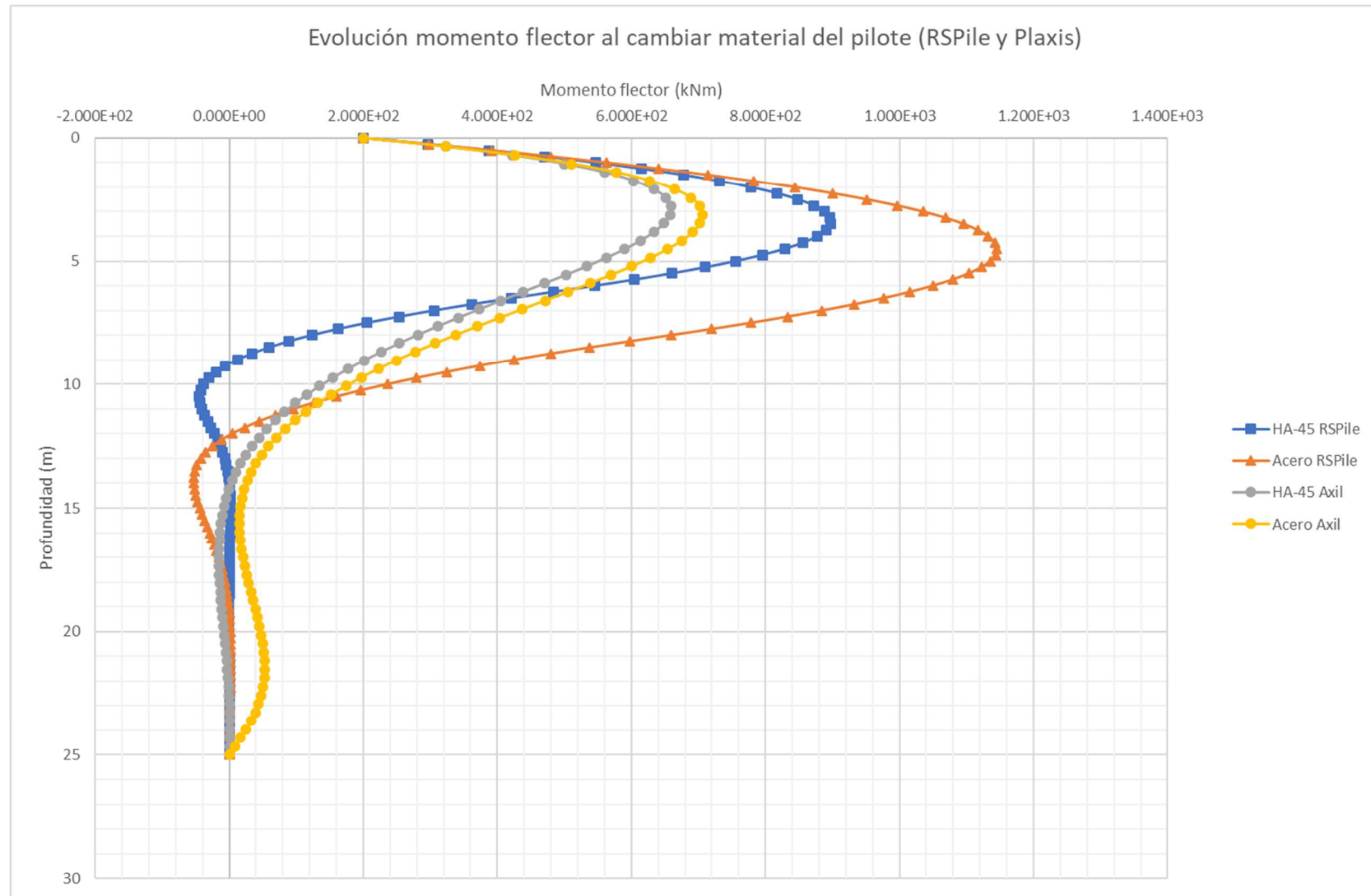


Figura 5.15. Evolución momento flector al cambiar material del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Esfuerzo cortante (RSPILE Y PLAXIS 2D)

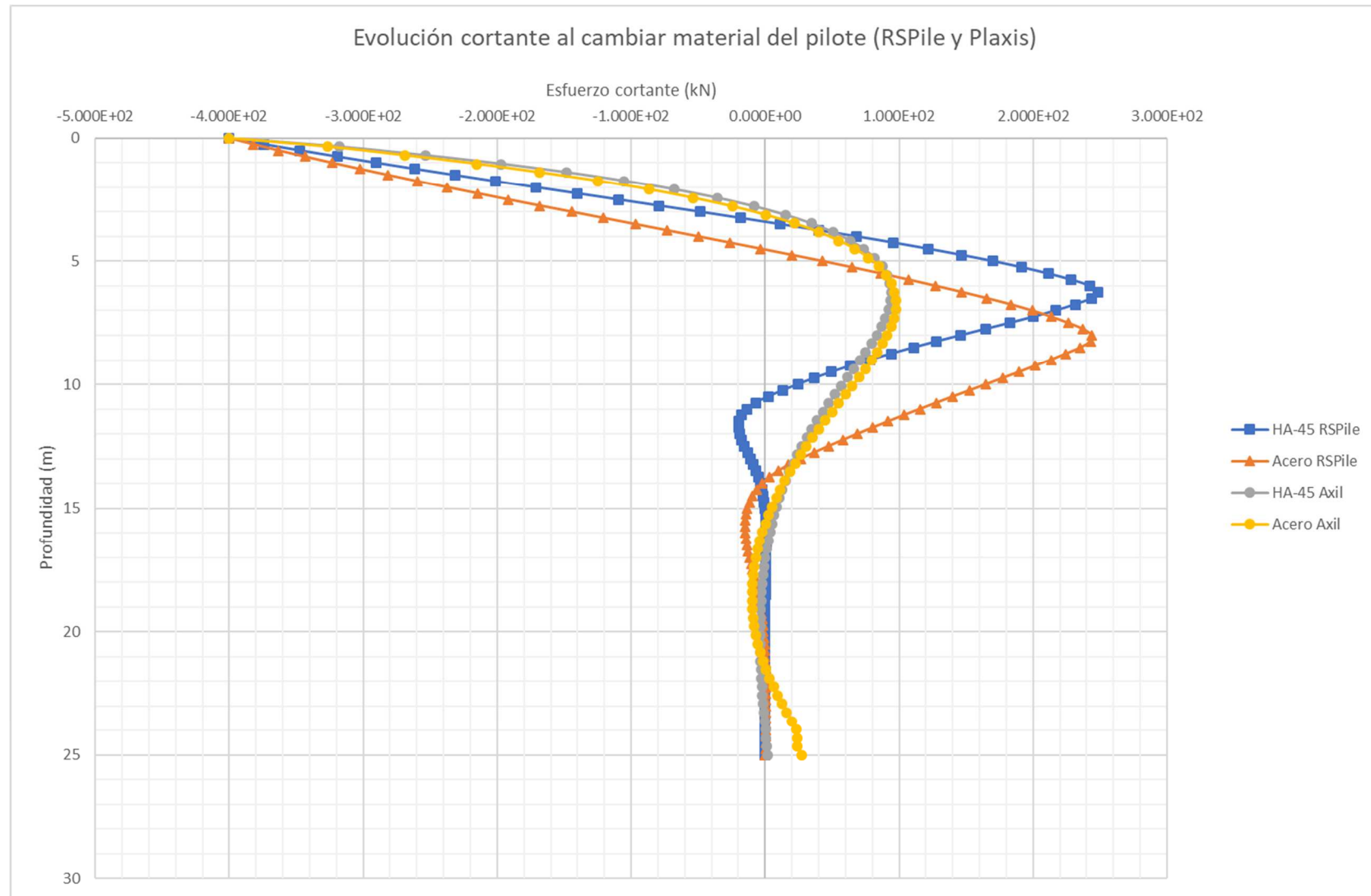


Figura 5.16. Evolución esfuerzo cortante al cambiar material del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Comentarios

Para los modelos del RSPILE y del PLAXIS 2D en terrenos arcillosos, cambiar el tipo de pilote tiene un efecto muy destacado en los resultados:

- **Desplazamiento:** En cuanto a los modelos empleados, según la **figura 5.13**, el mayor desplazamiento en cabeza es para el modelo de PLAXIS 2D. El pilote se desplazará más en cabeza y a lo largo del fuste si es de hormigón que si es de acero. Esto se debe a que el pilote de HA es menos rígido que el de acero. Este parámetro tiene una mayor influencia en el modelo del PLAXIS 2D que en el RSPILE si lo comparamos con la consistencia de la arcilla, donde la influencia en los modelos era viceversa. La diferencia del desplazamiento en cabeza es de, aproximadamente, 1.5cm. Ambos tipos de pilote disminuyen sus desplazamientos laterales con el aumento de la profundidad en el terreno.
- **Giro:** Los mayores giros en cabeza se observan, según la **figura 5.14**, con el modelo de RSPILE. El pilote de hormigón, por ejemplo, gira en cabeza cuatro veces más que el pilote de acero según el modelo de RSPILE y hasta 6.5 veces más según el modelo de PLAXIS 2D. El giro, en los dos tipos de pilote, disminuye de valor y cambia de signo a medida que aumenta la profundidad.
- **Momento flector:** Puede verse en la **figura 5.15** que, para ambos tipos de pilote, los máximos momentos se aprecian en el modelo de RSPILE. Al pasar de un pilote a otro, en el modelo de RSPILE, el pilote de acero llega a soportar un momento flector un 25% mayor que el pilote de hormigón. Para el modelo de PLAXIS 2D, este incremento no es tan pronunciado, pero se produce que, de manera general, el momento flector soportado aumenta con el aumento de E_p . En profundidad se aprecia que los momentos flectores tienden a disminuir o anularse primero en los pilotes de HA y después en los de acero.
- **Esfuerzo cortante:** En la **figura 5.16** puede observarse que, a mayor módulo del pilote E_p , mayor esfuerzo cortante para una misma profundidad; aunque para el modelo de PLAXIS 2D la diferencia es prácticamente nimia. Se repite el comportamiento de los apartados anteriores: los cortantes negativos, en ambos métodos, aumentan al aumentar el módulo del pilote E_p y disminuyen con la profundidad. Por otro lado, en los cortantes positivos, existen tramos donde el cortante es mayor en un pilote de HA que en uno de acero. Centrándonos en los valores positivos del esfuerzo cortante, en sendos modelos se alcanza un valor máximo, relativamente constante, que se produce a mayor profundidad con el aumento del módulo del pilote E_p para el modelo de RSPILE. También a destacar que, en dicho modelo, la profundidad donde se alcanza el valor nulo del esfuerzo cortante aumenta al aumentar el módulo del pilote E_p ; mientras que para el modelo de PLAXIS 2D, para el caso del pilote de acero, el valor del esfuerzo cortante es no nulo en la punta del pilote.

En ambos modelos el valor de E_p juega un papel importante. De manera general, un aumento de E_p se refleja en un descenso de los desplazamientos y en un aumento de los esfuerzos a lo largo del fuste, aunque este comportamiento sea menor en el cálculo del esfuerzo cortante para el modelo PLAXIS 2D. Podemos concluir, por tanto, que el tipo de material del pilote es un parámetro determinante en sendos modelos para el cálculo de los desplazamientos y de los esfuerzos en arcillas cuando un pilote se encuentra bajo una carga lateral y un momento en cabeza.

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

5.3 Pilote enterrado en terreno homogéneo arenoso

5.3.1 Influencia de la longitud del pilote para los métodos de cálculo de RSPILE Y PLAXIS 2D (Elemento *placa*).

Los parámetros del terreno (arena media) y del pilote se exponen a continuación según el método de cálculo en las **tablas 5.13 a 5.16**. En las **figuras 5.17 a 5.20** se muestran los resultados obtenidos de aplicar una fuerza lateral de 400kN y un momento flector de 200kNm en la cabeza del pilote según el modelo de RSPILE y de PLAXIS 2D Axilsimétrico.

Parámetros del terreno (arena media)	
Peso específico aparente γ [kN/m ³]	20
Peso específico saturado γ_{SAT} [kN/m ³]	23
Ángulo de rozamiento del terreno. [°]	35
Coefficiente k_{py} [kN/m ³]	24400
Tipo de suelo	Sand

Tabla 5.13. Parámetros del terreno (arena media) para RSPILE

Parámetros del terreno (arena media)	
Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb
Tipo de análisis	Drenado
Peso específico aparente γ [kN/m ³]	20
Peso específico saturado γ_{SAT} [kN/m ³]	23
Índice de poros e	0.3
Módulo de deformación E [kPa]	20*E3
Coefficiente de Poisson ν	0.35
Ángulo de rozamiento del terreno. [°]	35
Ángulo de dilatación del terreno. [°]	5

Tabla 5.14. Parámetros del terreno (arena media) para PLAXIS 2D

Parámetros del pilote (HA-45)	
Longitudes (m)	15 – 20 – 25 – 30
Tipo de pilote	Cilíndrico
Diámetro (m)	0.85
Tipo de material	Elástico
Módulo de Young E_P (kPa)	31928000

Tabla 5.15. Parámetros del pilote para RSPILE según longitud del pilote.

Parámetros del pilote (HA-45) (Elemento <i>placa</i>)	
Longitudes (m)	15 – 20 – 25 – 30
Diámetro (m)	0.85
Tipo de material	Elástico
Rigidez axial $E_P A_P$ [kN]	18.12 * E6
Rigidez a flexión $E_P I_P$ [kNm ²]	81.81 * E4
Peso de la placa w [kN/m ²]	4.25
Coefficiente de Poisson ν	0.2
Espesor de la placa equivalente d_{eq} [m]	0.74
Peso específico del material γ_p (kN/m ³)	25

Tabla 5.16. Parámetros del pilote para elemento *placa* (PLAXIS 2D) según longitud del pilote.

Desplazamiento lateral (RSPILE Y PLAXIS 2D)

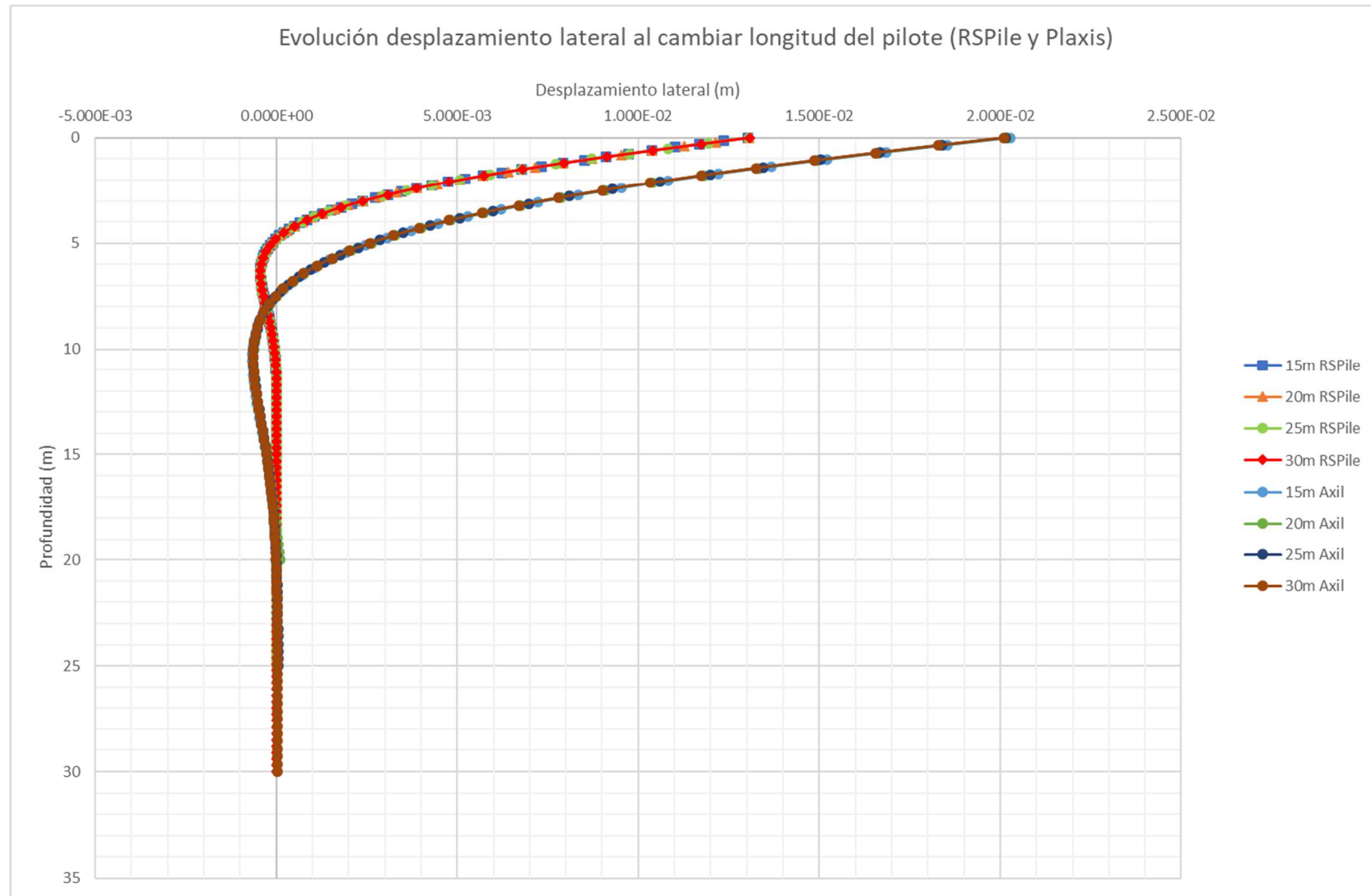


Figura 5.17. Evolución desplazamiento lateral al cambiar longitud del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Giro (RSPILE Y PLAXIS 2D)

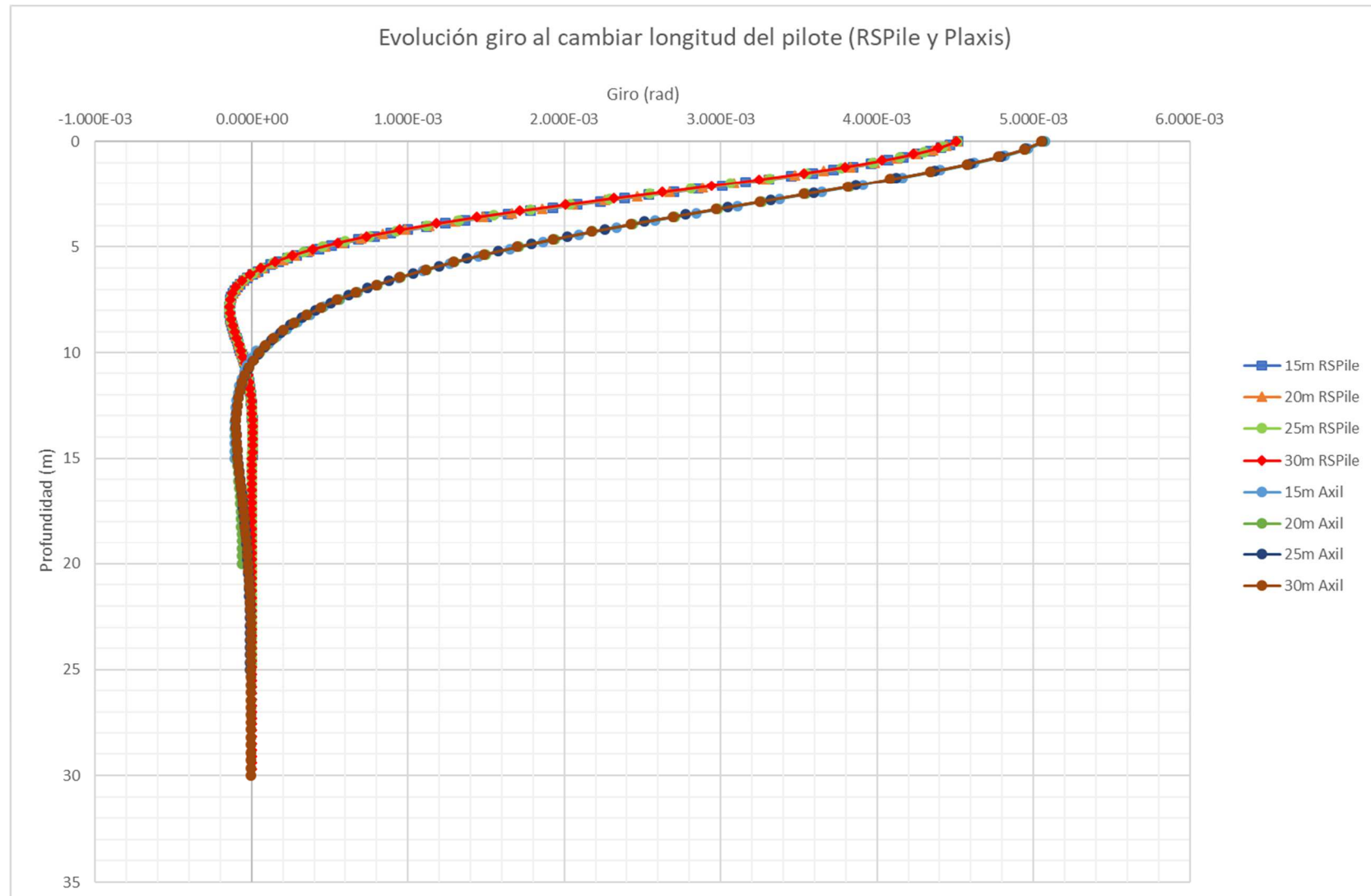


Figura 5.18. Evolución giro al cambiar longitud del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Momento flector (RSPILE Y PLAXIS 2D)

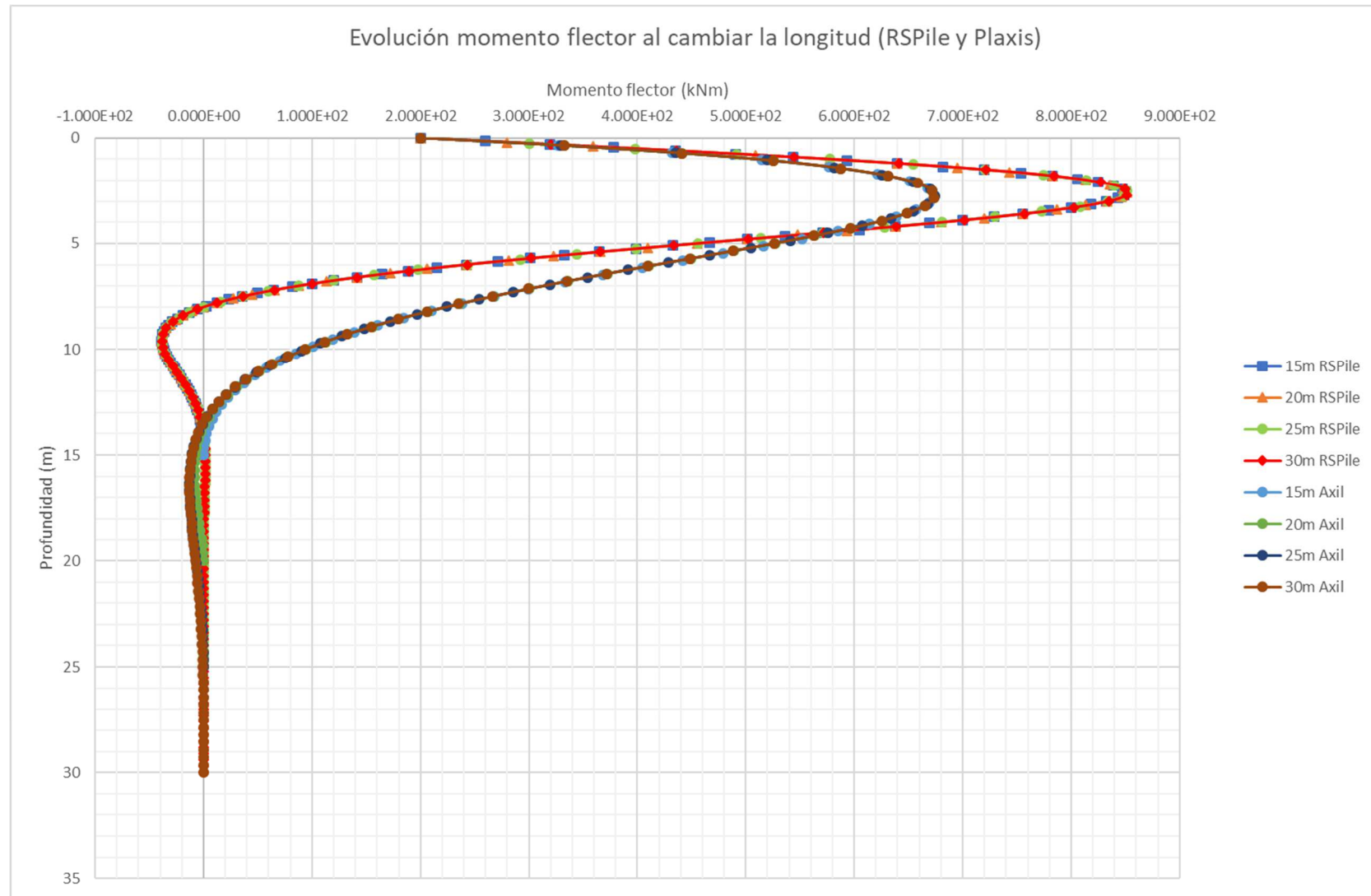


Figura 5.19. Evolución momento flector al cambiar longitud del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Esfuerzo cortante (RSPILE Y PLAXIS 2D)

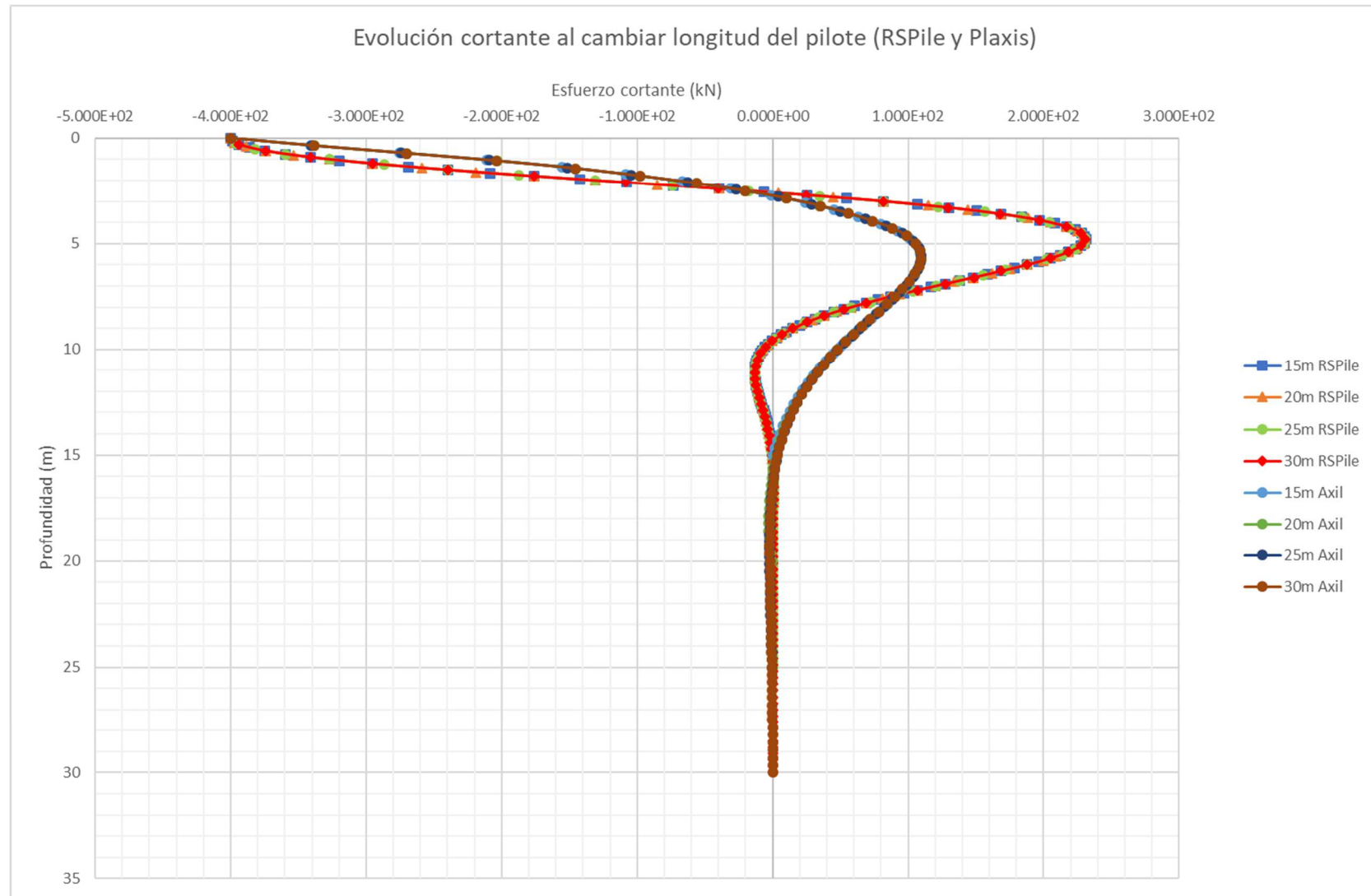


Figura 5.20. Evolución esfuerzo cortante al cambiar longitud del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Comentarios

A partir de las **figuras 5.17 a 5.20** y para los modelos del RSPILE y del PLAXIS 2D en terrenos arenosos, se pueden hacer los siguientes comentarios respecto al cambio de la longitud del pilote:

- **Desplazamiento lateral:** Aunque no se pueda observar con claridad en la **figura 5.17**, a medida que la longitud del pilote aumenta, los desplazamientos se reducen. Éstos son máximos en cabeza y mínimos o nulos a profundidades del entorno de los 10m. El desplazamiento de la cabeza del pilote para el caso de tener una longitud de 15m no difiere del experimentado por un pilote de 30m de largo. La diferencia entre estos dos casos es del orden de la décima de milímetro, algo totalmente despreciable. A lo largo del fuste del pilote la situación es idéntica: las diferencias entre el desplazamiento experimentado por el pilote de 15m y el de 30m son nimias.
- **Giros:** Se observa en la **figura 5.18** que con los giros ocurre algo similar que con los desplazamientos: el aumento de la longitud del pilote no provoca un decrecimiento considerable del giro. Para ambos métodos, el giro tiende a disminuir de valor y a cambiar de signo a medida que aumenta la profundidad.
- **Momentos flectores:** Se observa en la **figura 5.19** que el modelo de RSPILE presenta una envolvente con valores mayores que el modelo de PLAXIS 2D para profundidades menores a los 5m. El máximo momento flector se mueve entre los 2m-3m de profundidad del pilote. En sendos modelos (RSPILE y PLAXIS 2D), los momentos flectores tienden a anularse para profundidades mayores a los 15m.
- **Esfuerzos cortantes:** Se puede observar en la **figura 5.20** que el modelo de RSPILE presenta una envolvente con valores mayores que el modelo de PLAXIS 2D para profundidades menores a los 8m. El máximo esfuerzo cortante positivo se mueve alrededor de los 5m de profundidad del pilote. En sendos modelos (RSPILE y PLAXIS 2D), los cortantes tienden a anularse para profundidades mayores a los 15m.

Resumen diferencias entre los métodos: El modelo del RSPILE proporciona menores desplazamientos que el PLAXIS 2D; sin embargo, en los esfuerzos existen tramos donde el RSPILE proporciona valores superiores para una misma profundidad y viceversa. En cuanto a los valores máximos, tanto de momento flector como de cortante, es el modelo del RSPILE el que proporciona valores máximos superiores.

Podemos concluir, por tanto, que en terrenos arenosos la influencia de la longitud es irrelevante para ambos modelos numéricos en el cálculo de desplazamientos y esfuerzos cuando un pilote se ve sometido a una carga lateral y a un momento en cabeza.

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

5.3.2 Influencia del diámetro del pilote para los métodos de cálculo de RSPILE Y PLAXIS 2D (Elemento *placa*).

Los parámetros del terreno (arena media) son los mismos que los recogidos en la **tabla 5.13-5.14**, y los del pilote se exponen a continuación según el método de cálculo en las **tablas 5.17 y 5.18**. En las **figuras 5.21 a 5.24** se muestran los resultados obtenidos de aplicar una fuerza lateral de 400kN y un momento flector de 200kNm en la cabeza del pilote según el modelo de RSPILE y de PLAXIS 2D Axilsimétrico.

Parámetros del pilote (HA-45)	
Longitud (m)	25
Tipo de pilote	Cilíndrico
Diámetros (m)	0.85 – 1.00 – 1.25 – 1.50
Tipo de material	Elástico
Módulo de Young E_p (kPa)	31928000

Tabla 5.17. Parámetros del pilote para RSPILE según diámetro del pilote.

Parámetros del pilote (HA-45) (Elemento <i>placa</i>)				
Longitud (m)	15			
Diámetros (m)	0.85	1.00	1.25	1.50
Tipo de material	Elástico			
Rigidez axial $E_p A_p$ [kN]	18.12*E6	25.08*E6	39.18*E6	56.42*E6
Rigidez a flexión $E_p I_p$ [kNm ²]	81.81*E4	15.67*E5	38.26*E5	79.34*E5
Peso de la placa w [kN/m ²]	4.25	5	6.25	7.5
Coefficiente de Poisson ν	0.2			
Espesor de la placa equivalente d_{eq} [m]	0.74	0.866	1.083	1.299
Peso específico del material γ_p (kN/m ³)	25			

Tabla 5.18. Parámetros del pilote para elemento *placa* (PLAXIS 2D) según diámetro

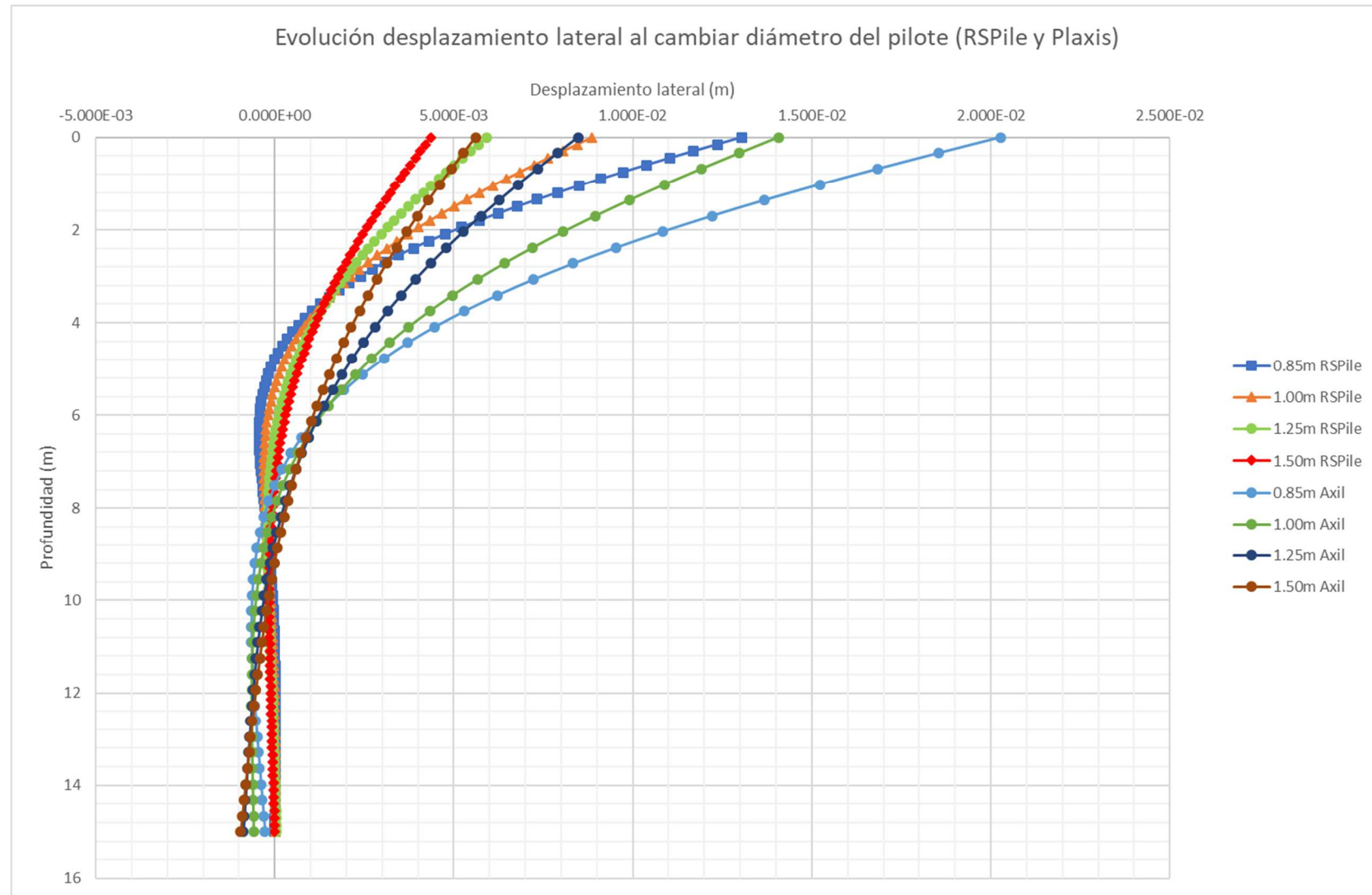
Desplazamiento lateral (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Figura 5.21. Evolución desplazamiento lateral al cambiar diámetro del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Giro (RSPILE Y PLAXIS 2D)

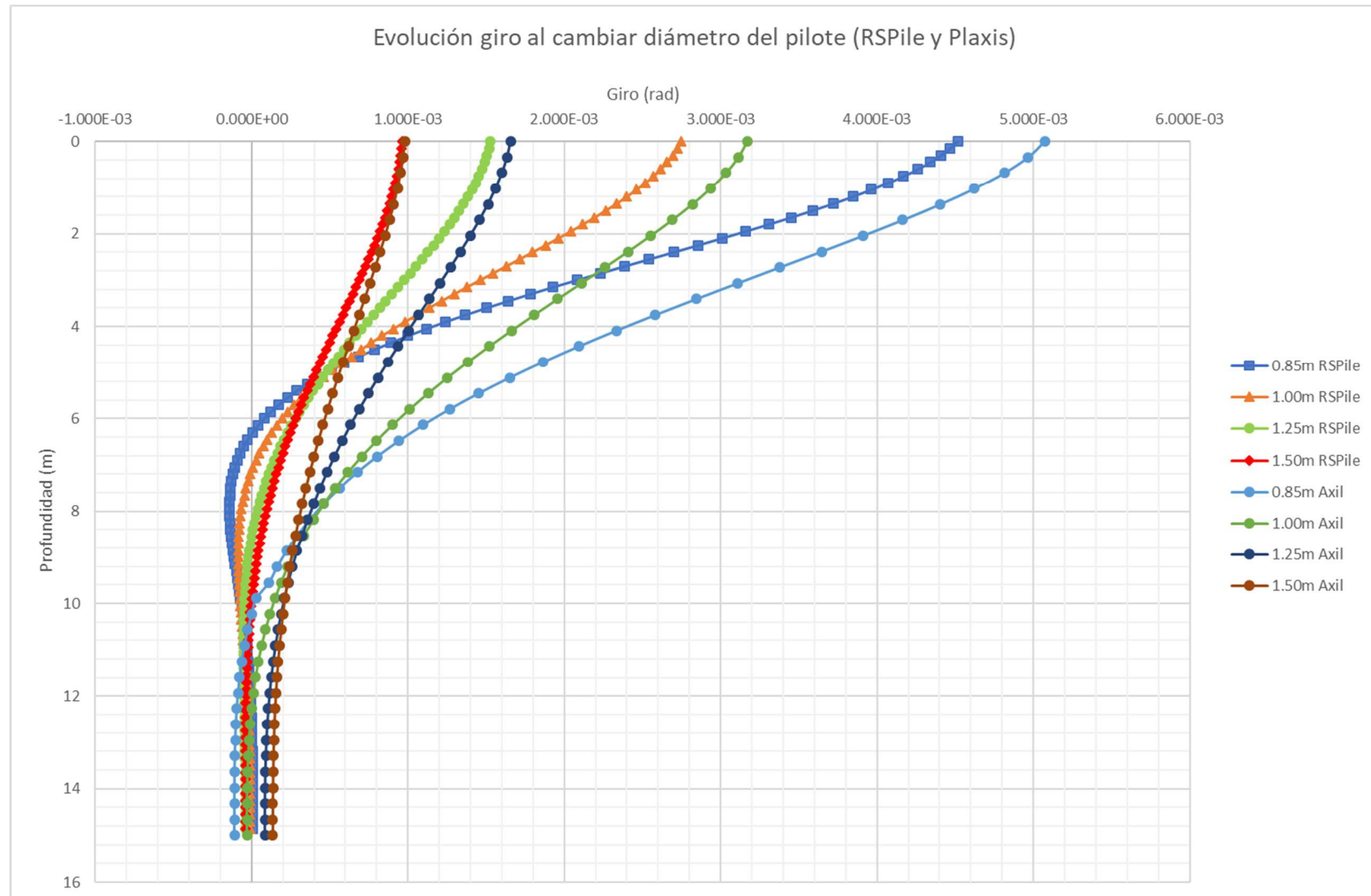


Figura 5.22. Evolución giro al cambiar diámetro del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Momento flector (RSPILE Y PLAXIS 2D)

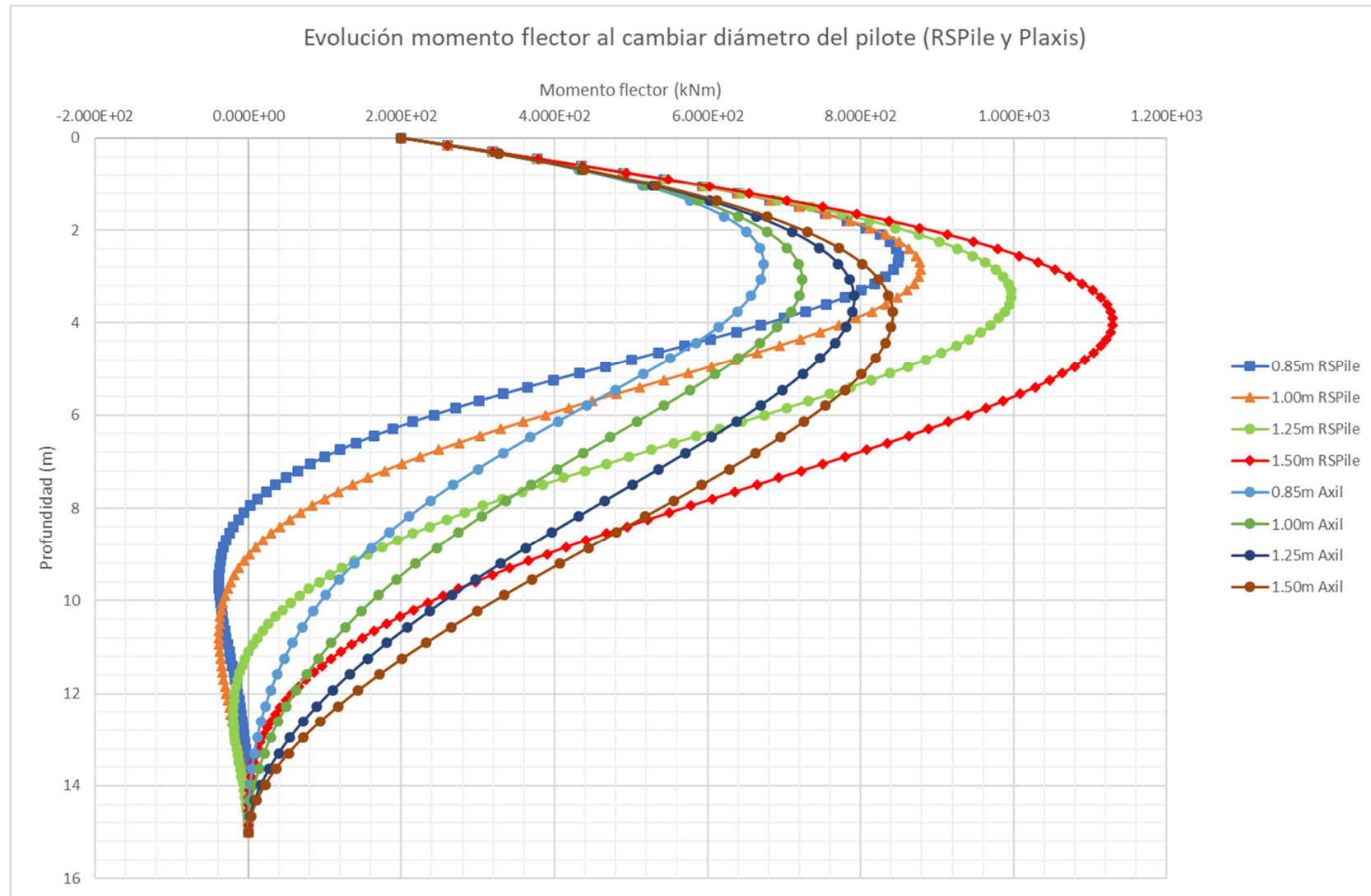


Figura 5.23. Evolución momento flector al cambiar diámetro del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Esfuerzo cortante (RSPILE Y PLAXIS 2D)

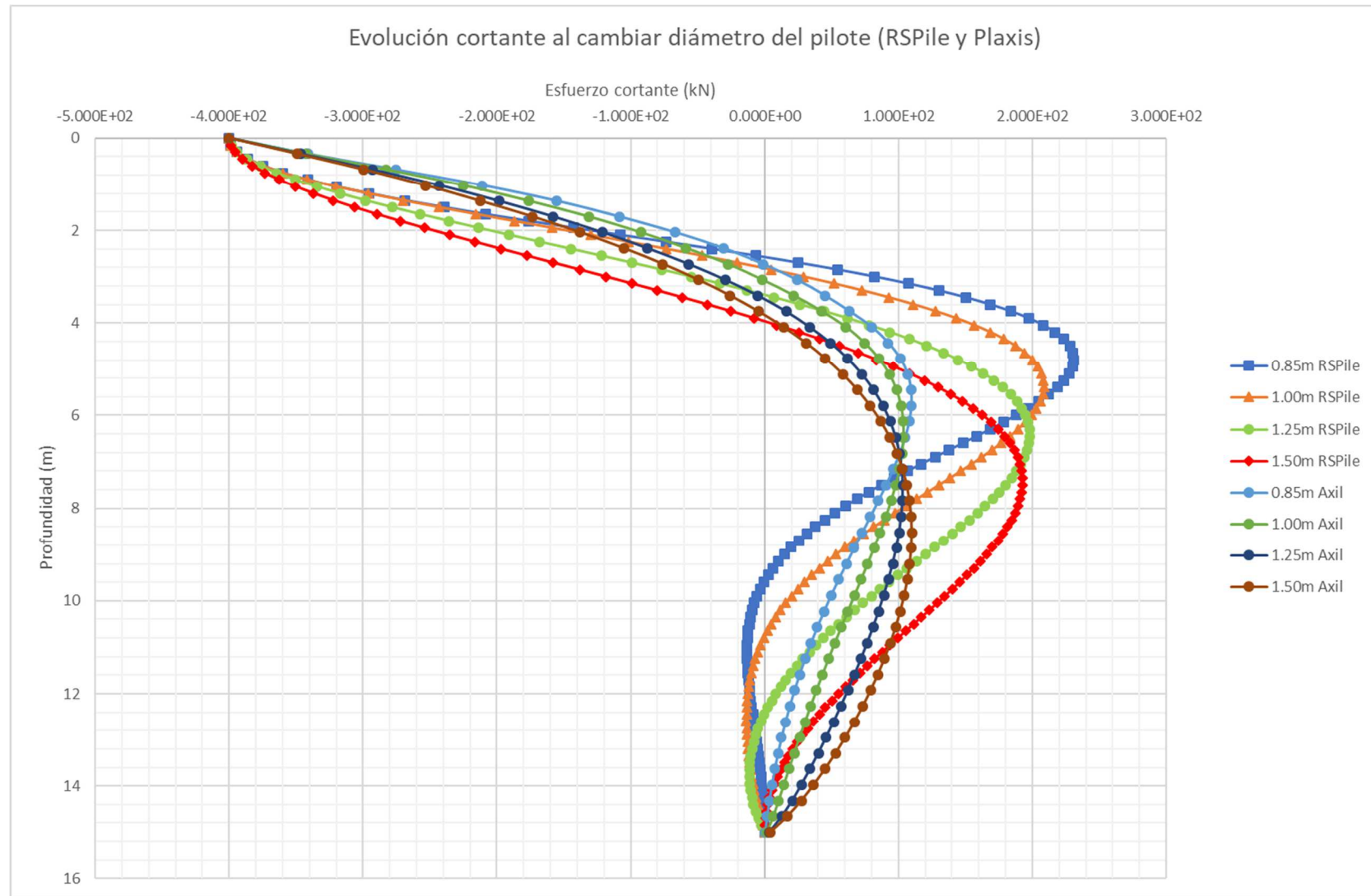


Figura 5.24. Evolución esfuerzo cortante al cambiar diámetro del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Comentarios

Para los modelos del RSPILE y del PLAXIS 2D en terrenos arenosos, cambiar el diámetro del pilote sí tiene un mayor efecto en los resultados:

- **Desplazamiento:** En la **figura 5.21** se observa que, al disminuir el diámetro, los mayores desplazamientos en la cabeza del pilote corresponden al modelo de PLAXIS 2D. En sendos modelos, para profundidades del entorno de los 9m, se aprecia un cambio en la dirección de los desplazamientos. Para el modelo de RSPILE, los desplazamientos son nulos a profundidades del entorno de los 10m. El desplazamiento de la cabeza del pilote para el caso de tener un diámetro de 0.85m es superior al experimentado por un pilote de 1.50m de diámetro en ambos modelos. La diferencia entre estos dos casos puede llegar a ser de 1.5cm (PLAXIS 2D).
- **Giro:** los valores del giro en la cabeza del pilote descienden de manera considerable con el aumento del diámetro (v. **figura 5.22**). El pilote de 0.85m gira cuatro veces más que el pilote de 1.50m en cabeza según el modelo de RSPILE y cinco según el de PLAXIS 2D, un ejemplo de la importancia del diámetro en el giro. Para ambos métodos, el giro tiende a disminuir de valor a medida que aumenta la profundidad.
- **Momento flector:** Se puede ver en la **figura 5.23** que los mayores momentos son debidos al modelo de RSPILE. El aumento del diámetro se traduce en un aumento del momento flector soportado: el pilote de 1.50m soporta un momento flector mayor que el pilote de 0.85m. Este aumento es más acusado en el modelo del RSPILE que en el PLAXIS 2D, siendo la diferencia en el primero de 280 kNm y de 165 kNm en el segundo. A su vez, este valor máximo se produce a mayor profundidad con el aumento del área del pilote. Se observa además que los momentos tienden a disminuir al aumentar la profundidad a partir de profundidades del entorno de los 3-4m.
- **Esfuerzo cortante:** Se aprecia en la **figura 5.24** que los cortantes negativos en ambos modelos aumentan con el aumento del diámetro del pilote y disminuyen con la profundidad. En el caso de los cortantes positivos, el comportamiento es al contrario: a mayor diámetro del pilote, menor cortante positivo. Centrándonos en los valores positivos del esfuerzo cortante, en sendos modelos se alcanza un valor máximo que se produce a mayor profundidad con el aumento del diámetro. En el modelo RSPILE este valor máximo disminuye con el aumento de área, mientras que en el modelo del PLAXIS 2D permanece constante.

Resumen diferencias entre los métodos: Los desplazamientos son menores en cabeza en el modelo del RSPILE para todos los casos; mientras que la distribución de los esfuerzos es mayor para este modelo, incluyendo los máximos valores de cada esfuerzo.

Podemos concluir, por tanto, que el diámetro sí es un parámetro determinante en ambos modelos de análisis para el cálculo de los desplazamientos y esfuerzos en un terreno granular cuando un pilote está sometido a una carga lateral y un momento en la cabeza.

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

5.3.3 Influencia de la compacidad del terreno para los métodos de cálculo de RSPILE Y PLAXIS 2D (Elemento *placa*).

Los parámetros del terreno (según compacidad) y del pilote se exponen a continuación según el método de cálculo en las **tablas 5.19 a 5.22**. En las **figuras 5.25 a 5.28** se muestran los resultados obtenidos de aplicar una fuerza lateral de 400kN y un momento flector de 200kNm en la cabeza del pilote según el modelo de RSPILE y de PLAXIS 2D Axilsimétrico.

Parámetros del terreno			
Compacidad del terreno	Floja	Media	Densa
Peso específico aparente γ [kN/m ³]	17	20	21
Peso específico saturado γ_{SAT} [kN/m ³]	20	23	23
Ángulo de rozamiento del terreno. [°]	30	35	40
Coefficiente k_{py} [kN/m ³]	6800	24400	61000
Tipo de suelo	Sand		

Tabla 5.19. Parámetros del terreno para RSPILE según compacidad del terreno.

Parámetros del terreno			
Compacidad del terreno	Floja	Media	Densa
Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb		
Tipo de análisis	Drenado		
Peso específico aparente γ [kN/m ³]	17	20	21
Peso específico saturado γ_{SAT} [kN/m ³]	20	23	23
Índice de poros e	0.40	0.30	0.20
Módulo de deformación E (kPa)	10000	20000	50000
Coefficiente de Poisson ν	0.40	0.35	0.30
Ángulo de rozamiento del terreno. [°]	30	35	40
Ángulo de dilatación del terreno. [°]	0	5	10

Tabla 5.20. Parámetros del terreno para PLAXIS 2D según compacidad del terreno.

Parámetros del pilote (HA-45)	
Longitud (m)	15
Tipo de pilote	Cilíndrico
Diámetro (m)	0.85
Tipo de material	Elástico
Módulo de Young E_P (kPa)	31928000

Tabla 5.21. Parámetros del pilote para RSPILE según compacidad del terreno.

Parámetros del pilote (HA-45) (Elemento <i>Placa</i>)			
Longitud [m]	15		
Módulo de deformación E_P (kPa)	31928000		
Peso específico del material γ_p (kN/m ³)	25		
Tipo de material	Elástico		
Diámetro (m)	0.85		
Compacidad del terreno	Floja	Media	Densa
Rigidez axial $E_P A_P$ [kN]	18.12 * E6		
Rigidez a flexión $E_P I_P$ [kNm ²]	81.81 * E4		
Peso de la placa w [kN/m ²]	6.80	4.25	3.40
Espesor de la placa equivalente d_{eq} [m]	0.74		
Coefficiente de Poisson ν	0.2		

Tabla 5.22. Parámetros del pilote para elemento *placa* (PLAXIS 2D) según compacidad del terreno

Desplazamiento lateral (RSPILE Y PLAXIS 2D)

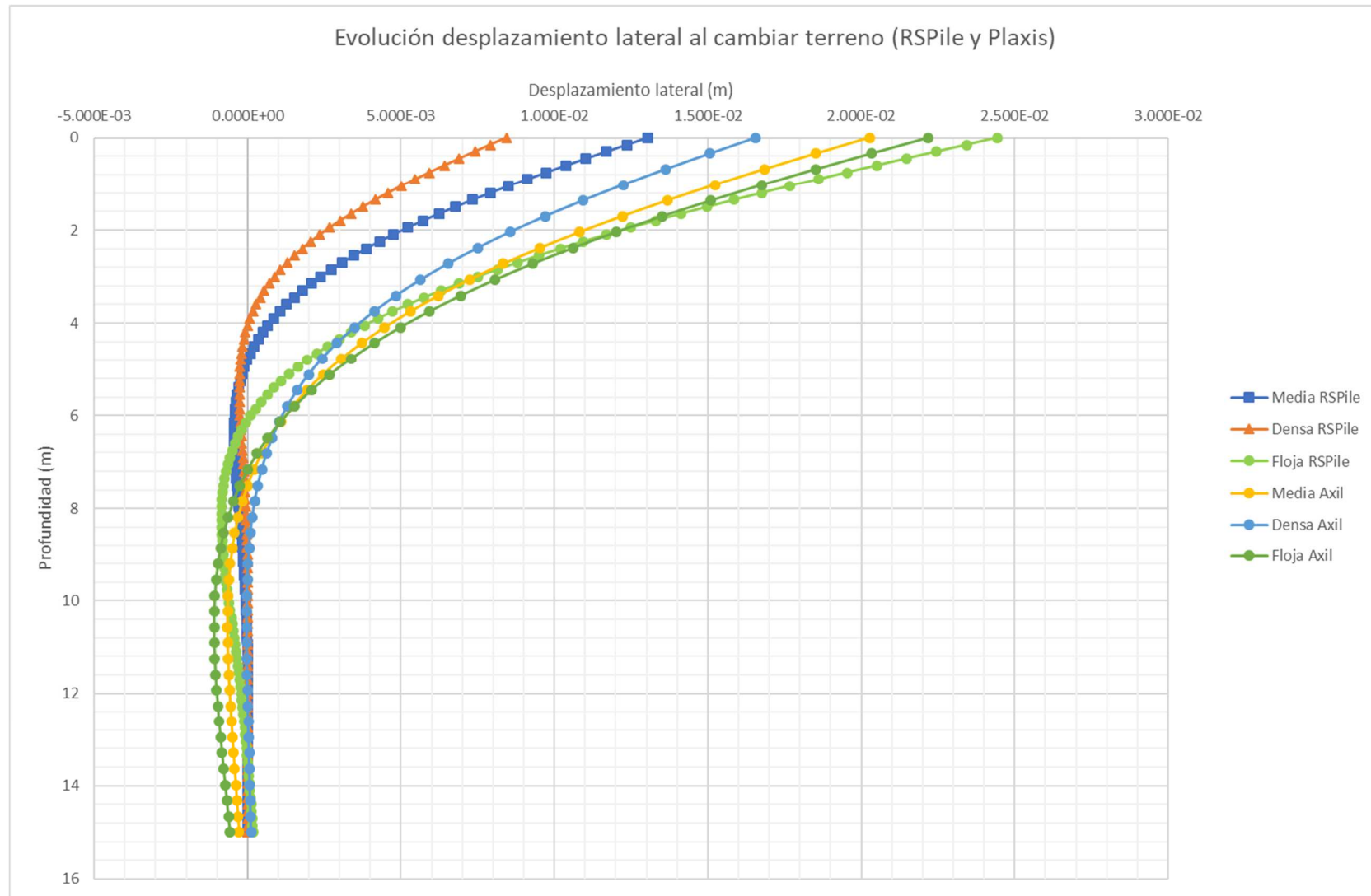


Figura 5.25. Evolución desplazamiento lateral al cambiar compacidad del terreno (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Giro (RSPILE Y PLAXIS 2D)

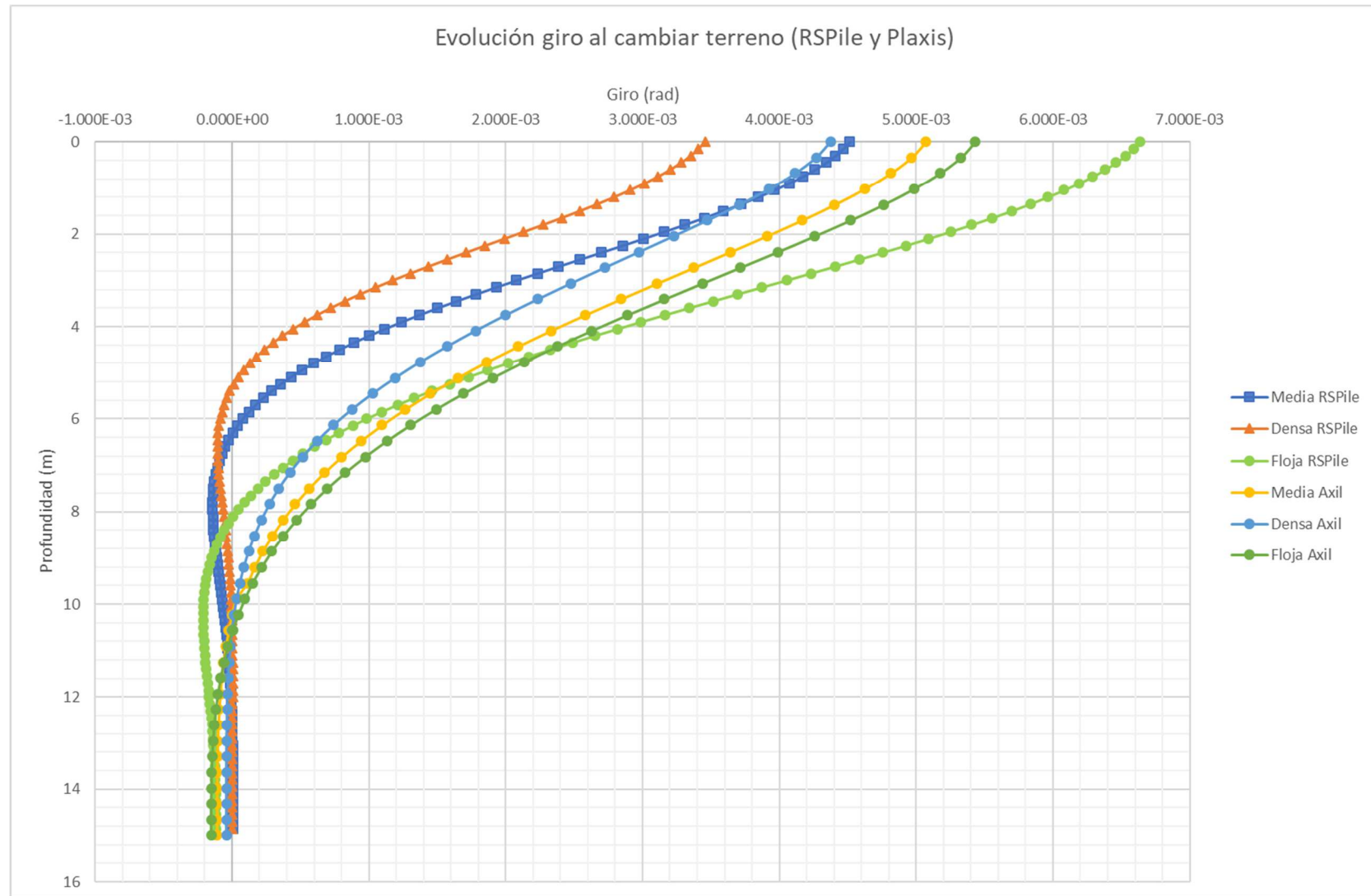


Figura 5.26. Evolución giro al cambiar compacidad del terreno (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Momento flector (RSPILE Y PLAXIS 2D)

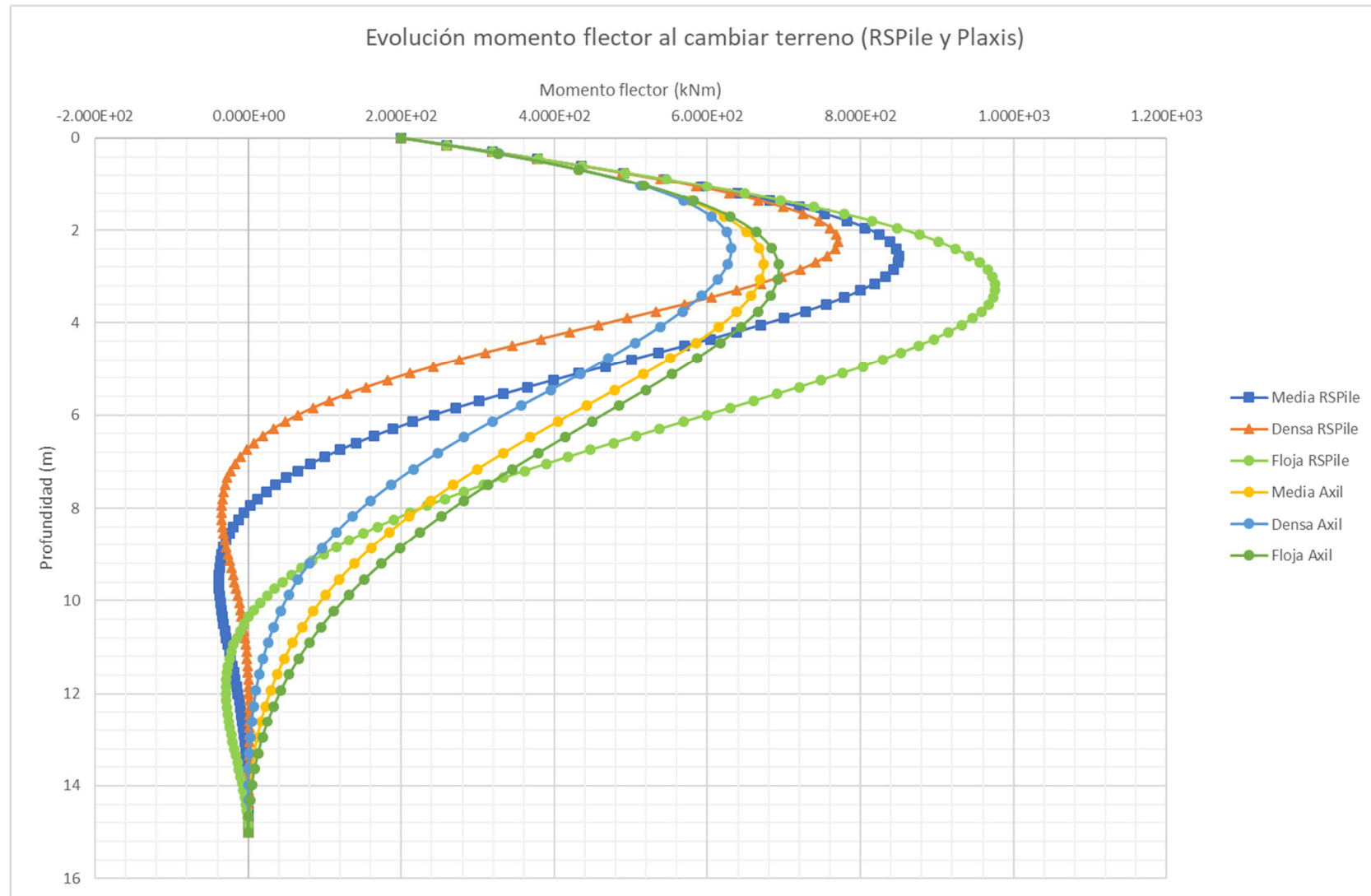


Figura 5.27. Evolución momento flector al cambiar compacidad del terreno (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Esfuerzo cortante (RSPILE Y PLAXIS 2D)

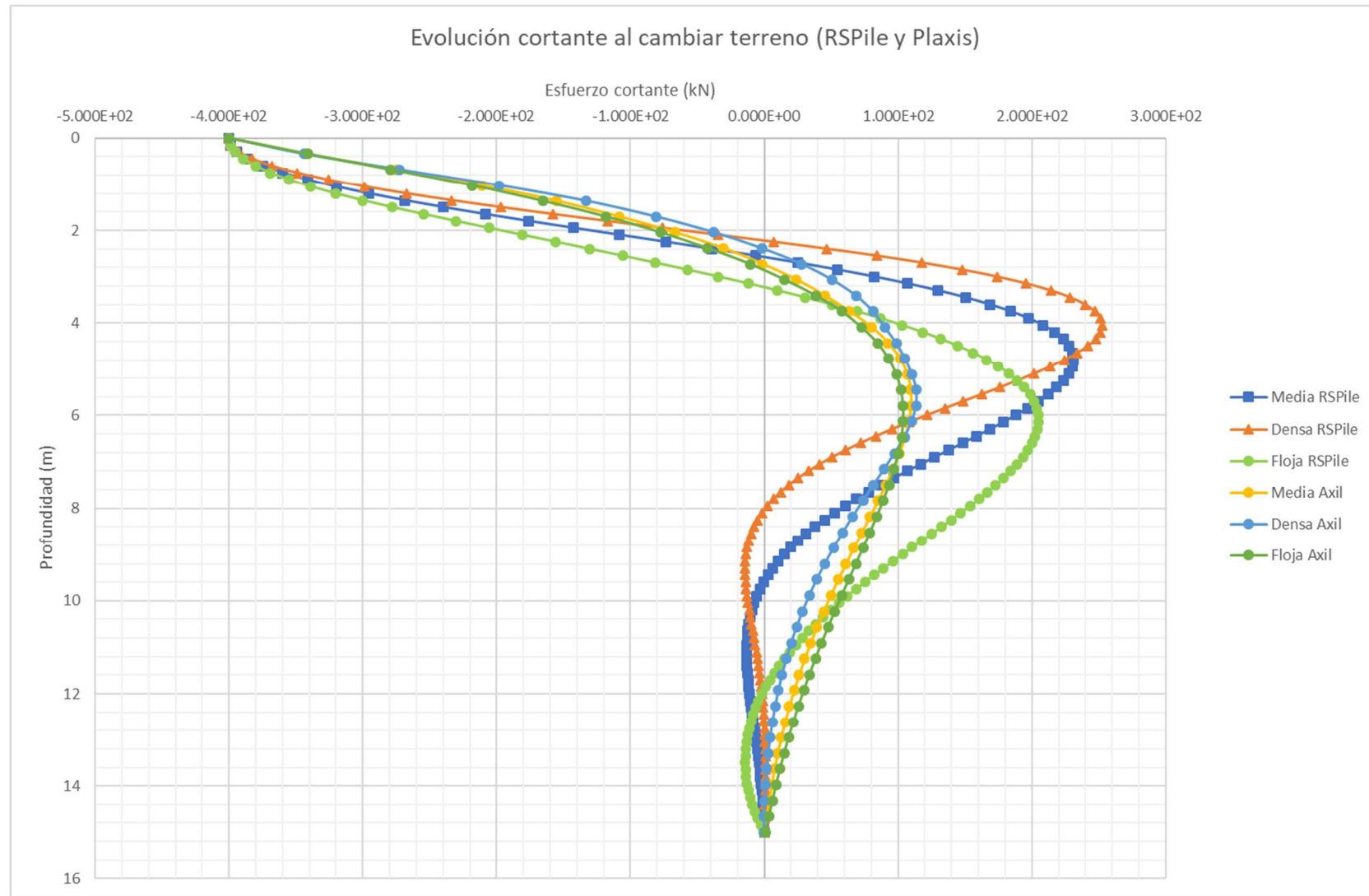


Figura 5.28. Evolución esfuerzo cortante al cambiar compacidad del terreno (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Comentarios

A partir de las **figuras 5.25 a 5.28** y para los modelos del RSPILE y del PLAXIS 2D en terrenos granulares, se pueden hacer los siguientes comentarios respecto al cambio de la compacidad de la arena:

- **Desplazamiento:** Según la **figura 5.25** y para arena floja, el modelo RSPILE presenta los mayores desplazamientos en cabeza. El pilote se desplazará más a lo largo de todo el fuste si lo enterramos en una arena floja que si lo hacemos en una arena densa. Mientras que la diferencia entre estos dos casos es de, aproximadamente, 1.5cm en cabeza para el modelo del RSPILE, esta diferencia es de sólo 0.5cm en el modelo de PLAXIS 2D. Para cualquier compacidad del terreno, ambos modelos tienden a reducir sus desplazamientos con el aumento de profundidad.
- **Giro:** Los valores del giro a lo largo del fuste descienden con el aumento de la compacidad (v. **figura 5.26**). En una arena floja, el pilote gira en cabeza, de media, un 50% más que si estuviera en una arena densa. Para ambos métodos, el giro tiende a disminuir de valor y a cambiar de signo a medida que aumenta la profundidad.
- **Momento flector:** En la **figura 5.27** puede verse que los mayores momentos son debidos al modelo de RSPILE y que, a cierta profundidad del terreno (4-6m), estos esfuerzos tienden a disminuir hasta anularse para cualquier compacidad del terreno. El aumento de la compacidad del terreno se traduce en un descenso del momento flector soportado: un pilote enterrado en una arena floja soporta un momento flector mayor que en un terreno denso. ¿A qué se debe esto? En la interfaz terreno flojo-pilote, la distribución de tensiones es casi uniforme y por tanto menor la curvatura. A menor curvatura, mayor serán los momentos en dichos puntos. Se puede llegar a producir un aumento de 200 kNm en una arena floja (RSPILE).
- **Esfuerzo cortante:** En la **figura 5.28** se puede observar que se repite el comportamiento de los apartados anteriores: a mejor terreno, menor esfuerzo cortante para una misma profundidad. Los cortantes negativos, en ambos métodos, aumentan al disminuir la compacidad del terreno y disminuyen con la profundidad. Por otro lado, en los cortantes positivos, existen tramos donde el cortante es mayor en una arena densa que en una arena floja. Centrándonos en los valores positivos del esfuerzo cortante, en sendos modelos se alcanza un valor máximo que se produce a menor profundidad con el aumento de la compacidad de la arena. Mientras que en el modelo del RSPILE, este valor disminuye con el descenso de la compacidad del terreno, en el modelo del PLAXIS 2D permanece, relativamente, constante. También a destacar que, en ambos modelos, la profundidad donde se alcanza el valor nulo de dicho esfuerzo aumenta con el descenso de la compacidad de la arena. En otras palabras, en una arena floja, el esfuerzo cortante se hará nulo a una profundidad mayor que si estuviese el pilote enterrado en una arena densa.

Resumen diferencias entre los métodos: Para el modelo del RSPILE, la compacidad del terreno juega un papel fundamental ya que depende directamente de ésta a través del coeficiente k_{py} . En el modelo del PLAXIS 2D, el papel de la compacidad es mucho menos importante. Fruto de esta importancia se observa, por ejemplo, en los máximos momentos: la diferencia entre el máximo momento medido en arena floja y densa es mucho mayor en el modelo RSPILE que en modelo de PLAXIS 2D.

Podemos concluir, por tanto, que el tipo de terreno es un parámetro determinante en el modelo del RSPILE para el cálculo de los desplazamientos y de los esfuerzos cuando un pilote se encuentra sometido a una carga lateral y a un momento en cabeza. Para el modelo del PLAXIS 2D, su contribución es relevante, pero no se equipara al diámetro (parámetro con mayor influencia en dicho método).

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

5.3.4 Influencia del tipo de material del pilote para los métodos de cálculo de RSPILE Y PLAXIS 2D (Elemento *placa*).

Los parámetros del terreno (arena media) son los mismos que los recogidos en la **tabla 5.13-5.14**, y los del pilote se exponen a continuación según el método de cálculo en las **tablas 5.23 y 5.24**. En las **figuras 5.29 a 5.32** se muestran los resultados obtenidos de aplicar una fuerza lateral de 400kN y un momento flector de 200kNm en la cabeza del pilote según el modelo de RSPILE y de PLAXIS 2D Axilsimétrico.

Parámetros del pilote		
Longitud (m)	15	
Tipo de pilote	Cilíndrico	
Diámetro (m)	0.85	
Material	Hormigón HA-45	Acero
Módulo de Young E_P (kPa)	31928000	210*E6

Tabla 5.23. Parámetros del pilote para RSPILE según material: HA-45 o Acero

Parámetros del pilote (Elemento <i>Placa</i>)		
Longitud [m]	15	
Material	Hormigón HA-45	Acero
Módulo de deformación E_P (kPa)	31928000	210*E6
Peso específico del material γ_p (kN/m ³)	25	76.93
Tipo de material	Elástico	
Diámetro (m)	0.85	
Compacidad del terreno	Media	
Rigidez axial $E_P A_P$ [kN]	18.12*E6	119.2*E6
Rigidez a flexión $E_P I_P$ [kNm ²]	81.81*E4	53.81*E5
Peso de la placa w [kN/m ²]	4.25	48.39
Espesor de la placa equivalente d_{eq} [m]	0.74	0.74
Coefficiente de Poisson ν	0.2	0.3

Tabla 5.24. Parámetros del pilote para elemento *placa* (PLAXIS 2D) según material: HA-45 o acero.

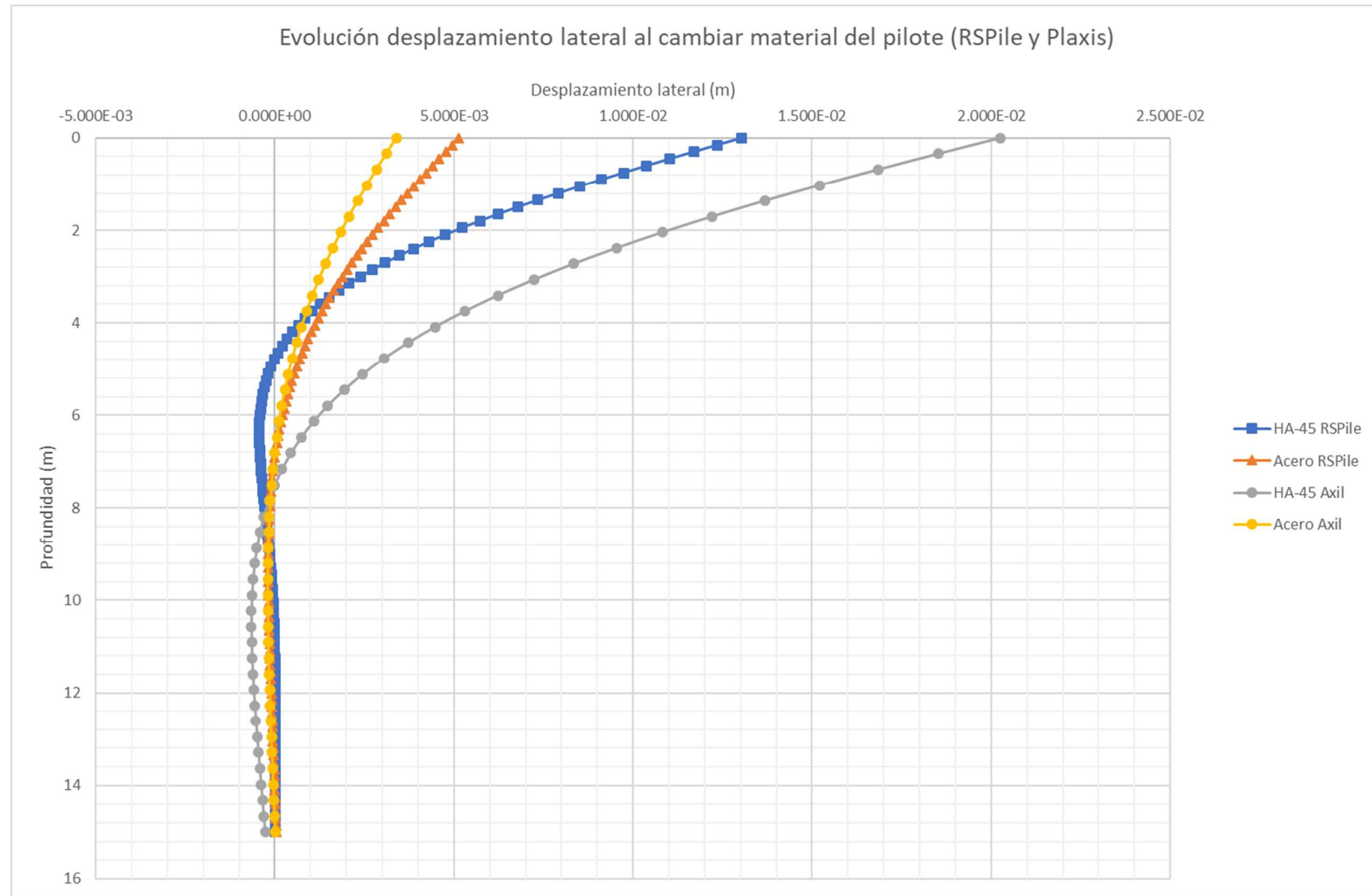
Desplazamiento lateral (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Figura 5.29. Evolución desplazamiento lateral al cambiar material del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Giro (RSPILE Y PLAXIS 2D)

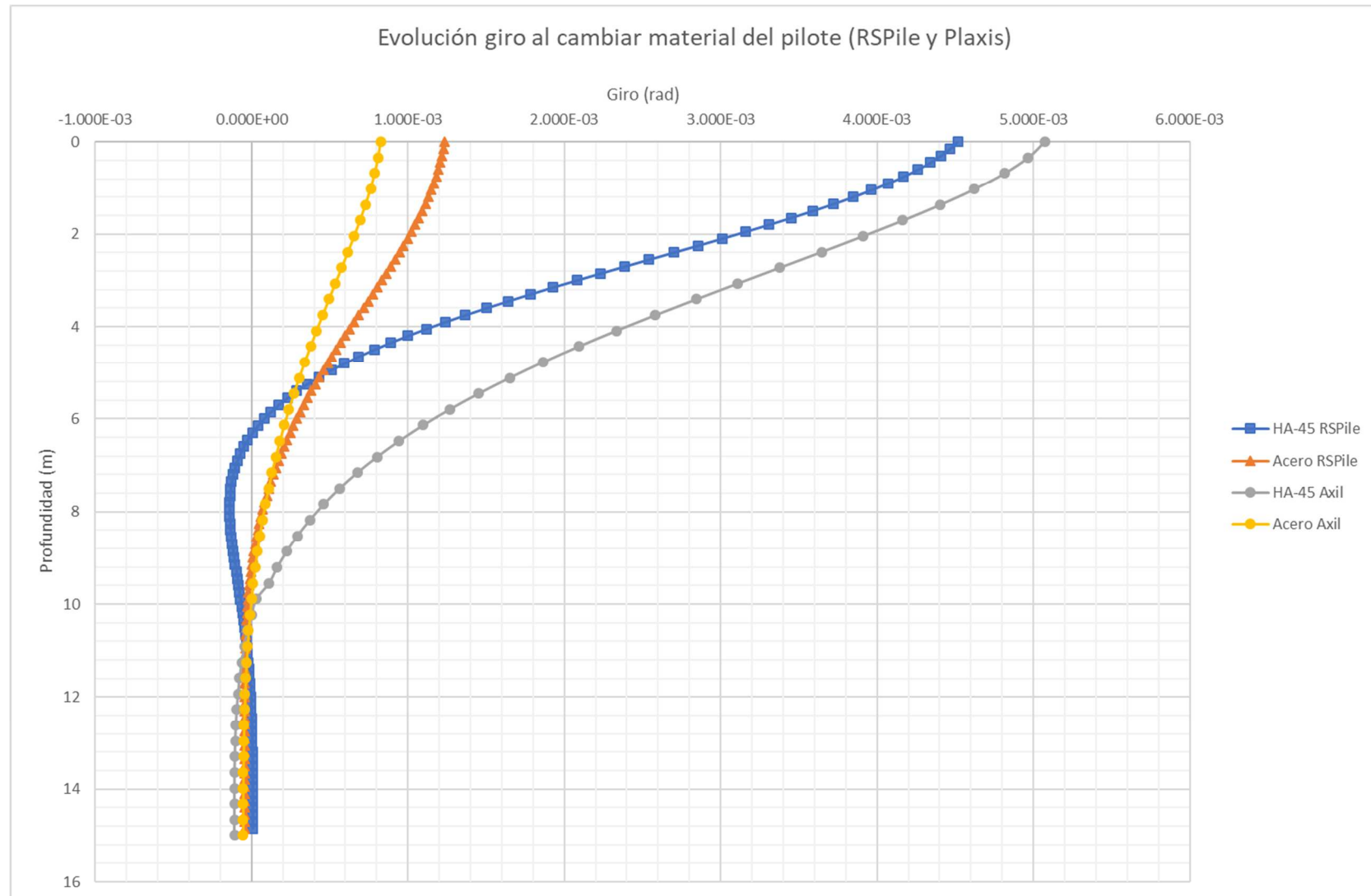


Figura 5.30. Evolución giro al cambiar material del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Momento flector (RSPILE Y PLAXIS 2D)

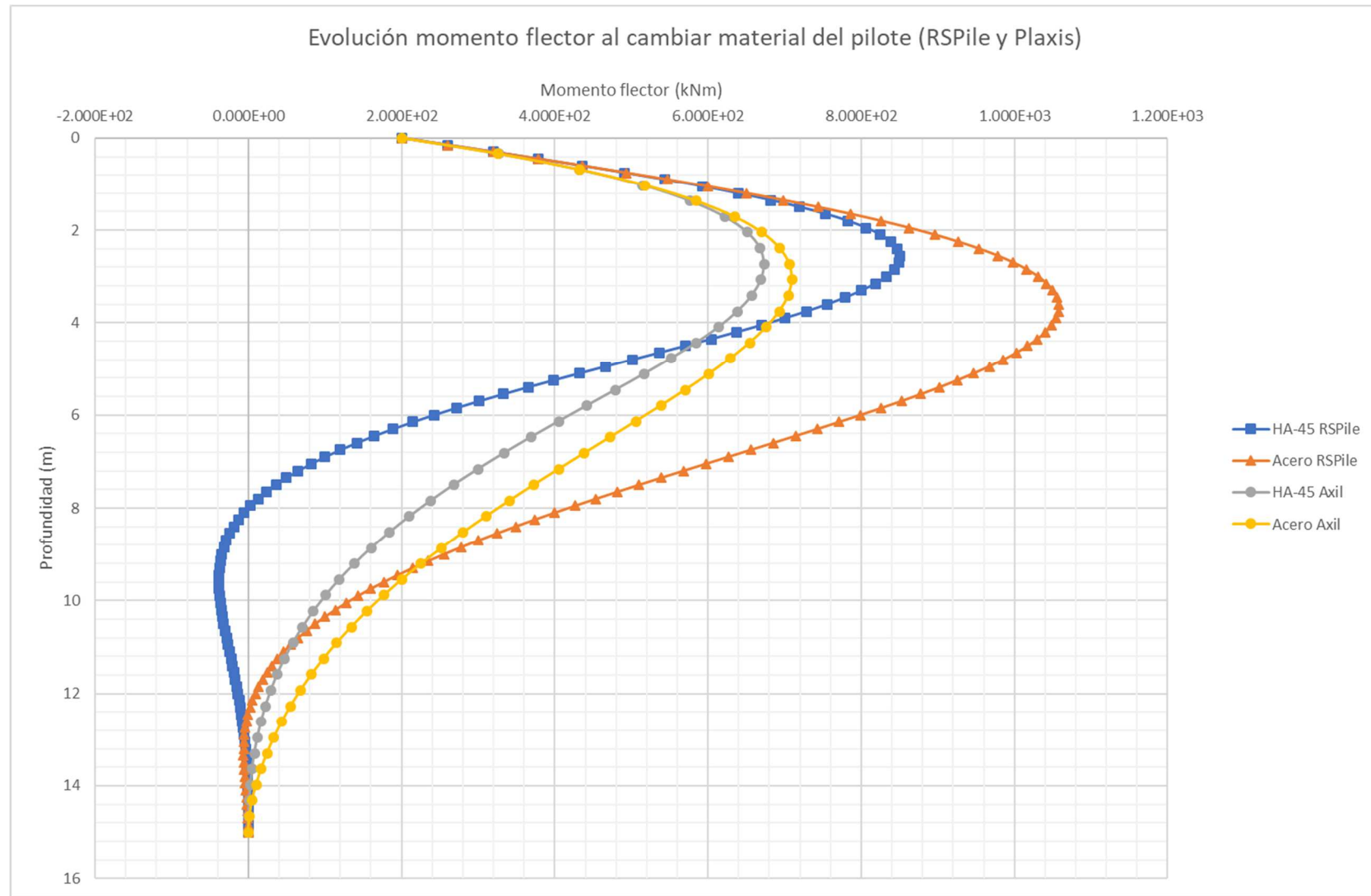


Figura 5.31. Evolución momento flector al cambiar material del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Esfuerzo cortante (RSPILE Y PLAXIS 2D)

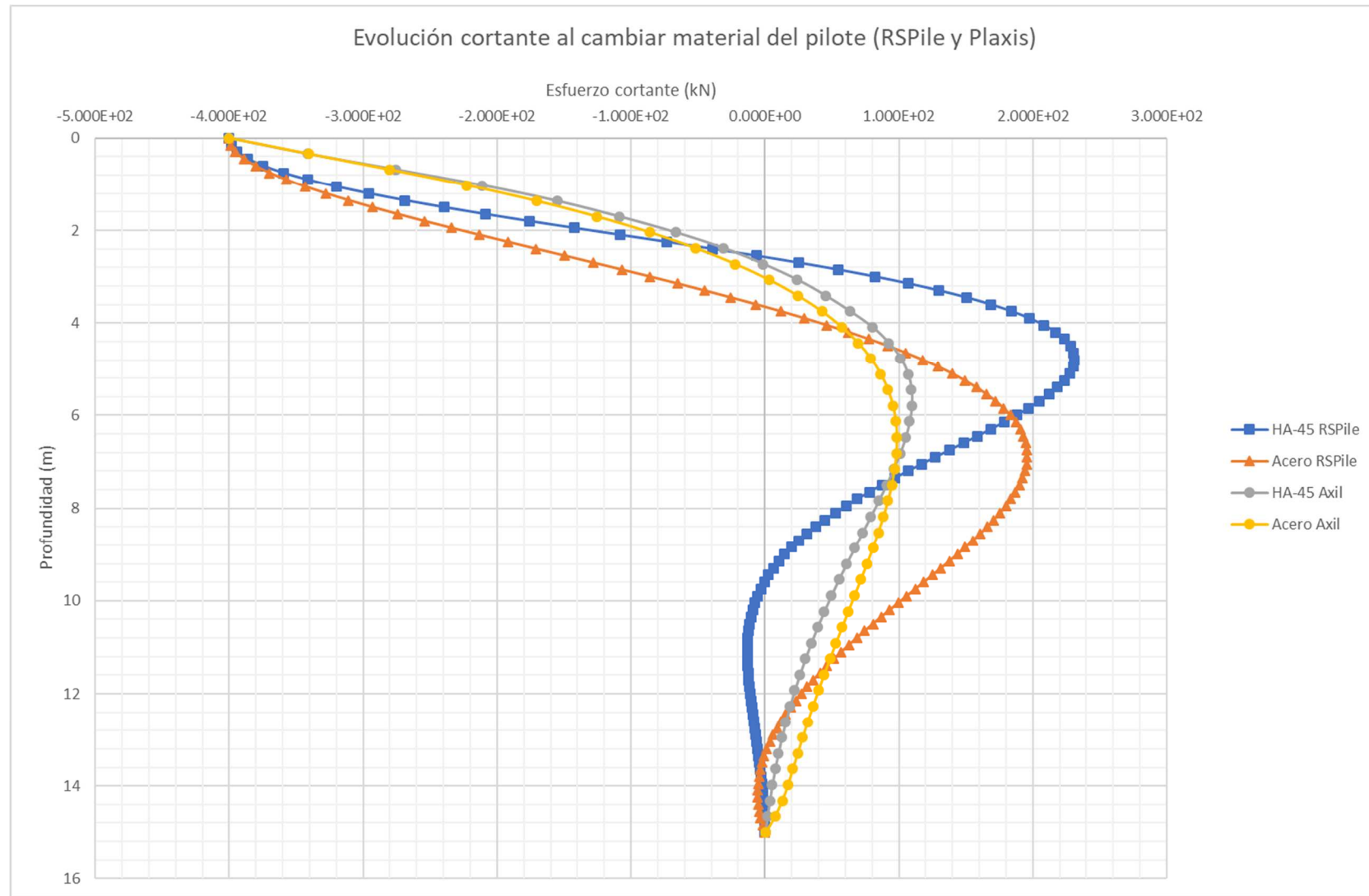


Figura 5.32. Evolución esfuerzo cortante al cambiar material del pilote (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Comentarios

Para los modelos del RSPILE y del PLAXIS 2D en arenas, cambiar el tipo de pilote tiene un efecto muy destacado en los resultados:

- **Desplazamiento:** En cuanto a los modelos empleados, según la **figura 5.29**, el mayor desplazamiento en cabeza es para el modelo de PLAXIS 2D. El pilote se desplazará más en cabeza y a lo largo del fuste si es de hormigón que si es de acero. Esto se debe a que el pilote de HA es menos rígido que el de acero. Este parámetro tiene una mayor influencia en el modelo del PLAXIS 2D que en el RSPILE si lo comparamos con la compacidad de la arena. La diferencia del desplazamiento en cabeza es de, aproximadamente, 0.8cm para RSPILE y de 1.7cm para PLAXIS 2D. Ambos tipos de pilote disminuyen sus desplazamientos laterales con el aumento de la profundidad en el terreno.
- **Giro:** Los mayores giros en cabeza se observan, según la **figura 5.30**, con el modelo de PLAXIS 2D. El pilote de hormigón, por ejemplo, gira en cabeza cuatro veces más que el pilote de acero según el modelo de RSPILE y hasta seis veces más según el modelo de PLAXIS 2D. El giro, en los dos tipos de pilote, disminuye de valor y cambia de signo a medida que aumenta la profundidad.
- **Momento flector:** Puede verse en la **figura 5.31** que, para ambos tipos de pilote, los máximos momentos se aprecian en el modelo de RSPILE. Al pasar de un pilote a otro, en el modelo de RSPILE, el pilote de acero llega a soportar un momento flector un 25% mayor que el pilote de hormigón. Para el modelo de PLAXIS 2D, este incremento no es tan pronunciado, pero se produce que, de manera general, el momento flector soportado aumenta con el aumento de E_p .
- **Esfuerzo cortante:** En la **figura 5.32** puede observarse que, a mayor módulo del pilote E_p , mayor esfuerzo cortante para una misma profundidad. Se repite el comportamiento de los apartados anteriores: los cortantes negativos, en ambos métodos, aumentan al aumentar el módulo del pilote E_p y disminuyen con la profundidad. Por otro lado, en los cortantes positivos, existen tramos donde el cortante es mayor en un pilote de HA que en uno de acero. Centrándonos en los valores positivos del esfuerzo cortante, en sendos modelos se alcanza un valor máximo que disminuye con el aumento de E_p , pero se produce a mayor profundidad con el aumento de éste.

En ambos modelos el valor de E_p juega un papel importante. De manera general, un aumento de E_p se refleja en un descenso de los desplazamientos y en un aumento de los esfuerzos a lo largo del fuste. Podemos concluir, por tanto, que el tipo de material del pilote es un parámetro determinante para el modelo del RSPILE en el cálculo de los desplazamientos y de los esfuerzos en terrenos arenosos cuando sometemos un pilote a una carga lateral y a un momento en la cabeza. Para el modelo del PLAXIS 2D, este parámetro influye en menor medida, pero no por ello los cambios son despreciables.

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

5.3.5 Influencia de la existencia del NF para los métodos de cálculo de RSPILE Y PLAXIS 2D (Elemento *placa*).

Los parámetros del terreno (arena media) y del pilote se recogen en las **tablas 5.25 y 5.26** según el método de cálculo.

Parámetros del terreno (arena media)		
Peso específico aparente γ [kN/m ³]	20	
Peso específico saturado γ_{SAT} [kN/m ³]	23	
Ángulo de rozamiento del terreno. [°]	35	
Condiciones del terreno	Seco	Sumergido
Coefficiente k_{py} [kN/m ³]	24400	16300
Tipo de suelo	Sand	

Tabla 5.25. Parámetros del terreno (arena media) para RSPILE según presencia del nivel freático

Los parámetros de la arena media para PLAXIS 2D son los mismos que los recogidos en la **tabla 5.14**.

Los parámetros del pilote (HA-45) para RSPILE son los mismos que los recogidos en la **tabla 5.21**.

Parámetros del pilote (HA-45) (Elemento <i>Placa</i>)		
Longitud [m]	15	
Módulo de deformación E_p (kPa)	31928000	
Peso específico del material γ_p (kN/m ³)	25	
Tipo de material	Elástico	
Diámetro (m)	0.85	
Condiciones del terreno	Seco	Sumergido
Rigidez axial $E_p A_p$ [kN]	18.12*E6	
Rigidez a flexión $E_p I_p$ [kNm ²]	81.81*E4	
Peso de la placa w [kN/m ²]	4.25	1.70
Espesor de la placa equivalente d_{eq} [m]	0.74	
Coefficiente de Poisson ν	0.2	

Tabla 5.26. Parámetros del pilote para elemento *placa* (PLAXIS 2D) según presencia del nivel freático.

En las **figuras 5.33 a 5.36** se muestran los resultados obtenidos de aplicar una fuerza lateral de 400kN y un momento flector de 200kNm en la cabeza del pilote según el modelo de RSPILE y de PLAXIS 2D Axilsimétrico.

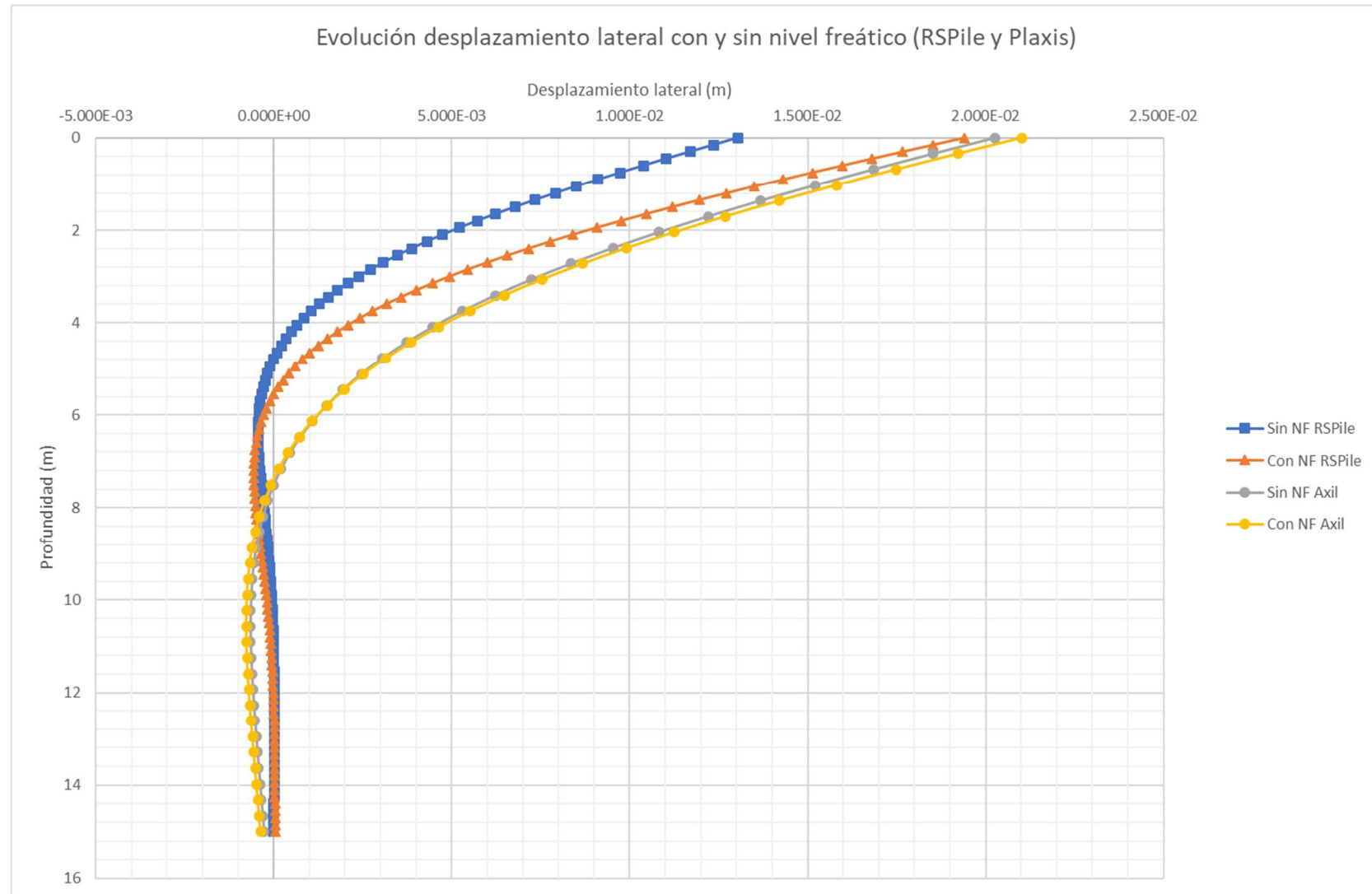
Desplazamiento lateral (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Figura 5.33. Evolución desplazamiento lateral según existencia del NF (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Giro (RSPILE Y PLAXIS 2D)

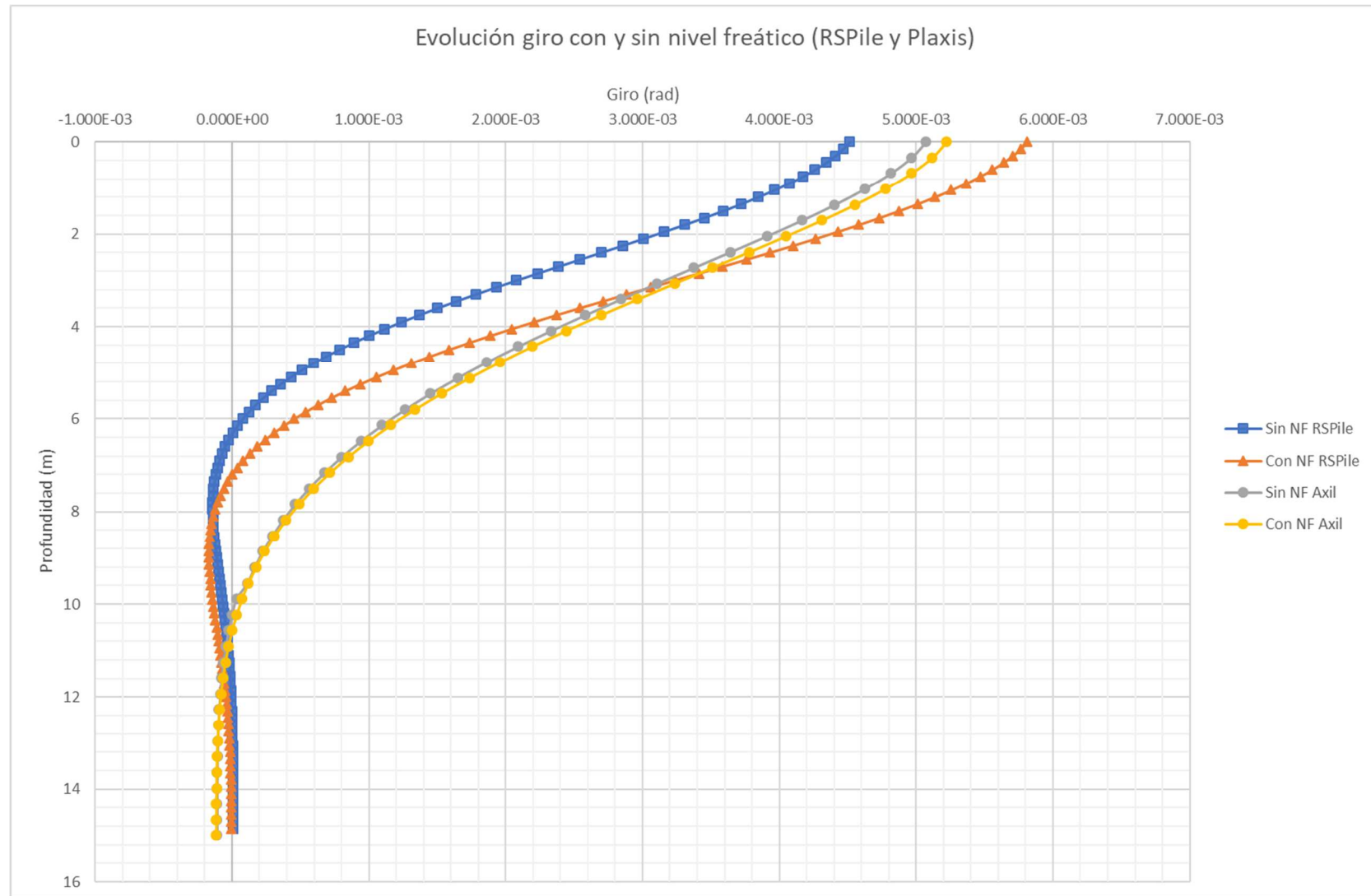


Figura 5.34. Evolución giro según existencia del NF (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Momento flector (RSPILE Y PLAXIS 2D)

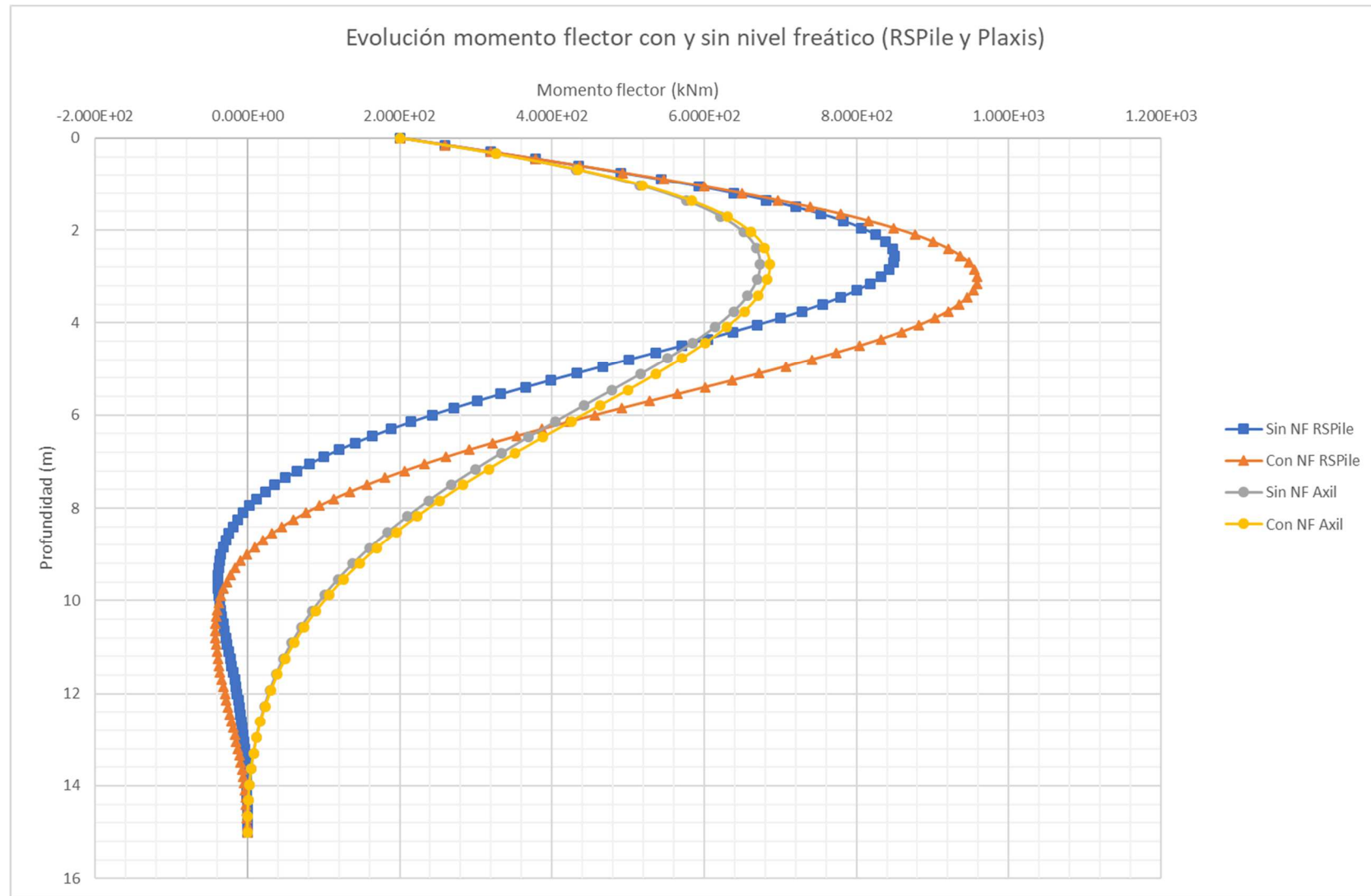


Figura 5.35. Evolución momento flector según existencia del NF (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Método de diferencias finitas (RSPILE) y elementos finitos (PLAXIS 2D). Cálculo de desplazamientos y esfuerzos de un pilote aislado cargado lateralmente y su evolución.

Esfuerzo cortante (RSPILE Y PLAXIS 2D)

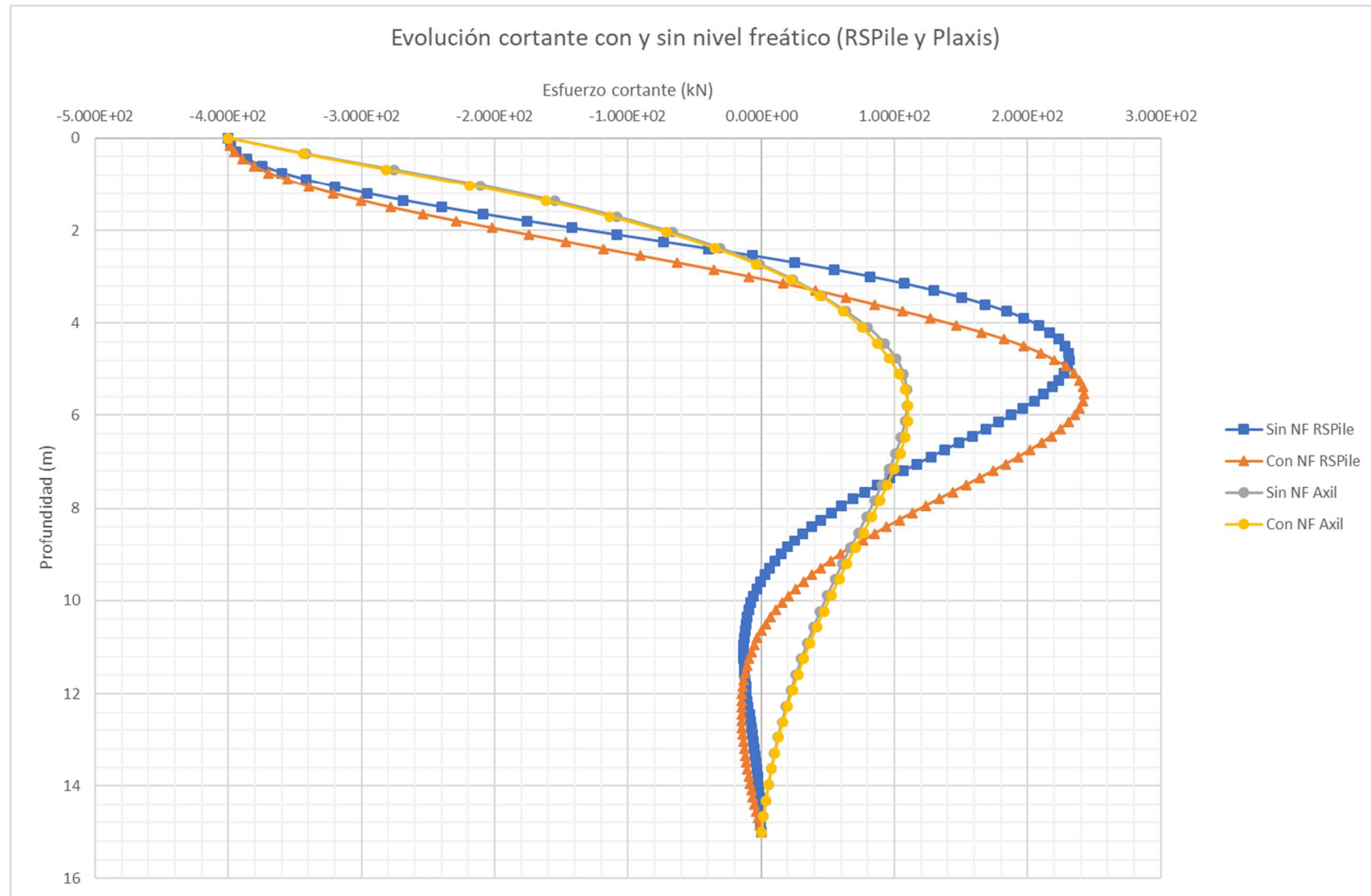


Figura 5.36. Evolución esfuerzo cortante según existencia del NF (RSPILE Y PLAXIS 2D)

Comentarios

Para los modelos del RSPILE y del PLAXIS 2D, la presencia del nivel freático tiene leves efectos en los resultados. El terreno se comporta como un terreno de menor compacidad ya que el peso específico y el coeficiente k_{py} que actúan son los sumergidos:

- **Desplazamiento:** Según la **figura 5.33** y para arena sumergida, el modelo normativo presenta los mayores desplazamientos en cabeza. El pilote se desplazará más en cabeza si lo enterramos en una arena sumergida que si lo hacemos en una arena donde el NF se encuentre a una profundidad tal que no se vea afectado el pilote por éste en ningún punto de su longitud. La diferencia entre los desplazamientos experimentados en terreno seco y sumergido es de, aproximadamente, 0.6cm en el modelo del RSPILE; mientras que la diferencia es menor del milímetro en el modelo de PLAXIS 2D.
- **Giro:** los valores del giro en la cabeza del pilote aumentan levemente con la presencia del nivel freático (v. **figura 5.34**), siendo el aumento mayor de nuevo en el modelo del RSPILE (30%). En ambos modelos, el giro tiende a disminuir de valor y a cambiar de signo a medida que la profundidad es mayor.
- **Momento flector:** En la **figura 5.35** se puede observar que los mayores momentos son debidos al modelo de RSPILE y que, a cierta profundidad del terreno, estos esfuerzos tienden a anularse tanto para una arena sumergida como seca. La presencia del freático se traduce en un aumento del momento flector soportado: un pilote enterrado en una arena sumergida soporta un momento flector mayor que en un terreno seco. En el modelo RSPILE este aumento es mayor que en el modelo PLAXIS 2D (+100kNm frente a 10kNm).
- **Esfuerzo cortante:** En la **figura 5.36** se puede observar que se repite el comportamiento del **apartado 5.3.3**: en terreno seco, se produce un menor esfuerzo cortante para una misma profundidad de manera general. Los cortantes negativos, en ambos métodos, aumentan con la presencia del NF y disminuyen con la profundidad. Por otro lado, los cortantes positivos alcanzan un valor máximo que se produce a mayor profundidad en presencia del NF. En el modelo de RSPILE, este valor se ve incrementado cuando la arena se encuentra sumergida; mientras que, en el modelo de PLAXIS 2D, permanece prácticamente invariable.

Resumen diferencias entre los métodos: las diferencias en los resultados para un mismo modelo son más acusadas en el RSPILE que en el PLAXIS 2D. Esta tendencia se observa en las cuatro figuras precedentes. Podemos concluir, por tanto, que la presencia del freático es un parámetro de cierta relevancia en sendos modelos para el cálculo de los desplazamientos y de los esfuerzos, pero su papel es más destacado en el modelo RSPILE que en el modelo PLAXIS 2D cuando se aplica una carga lateral y un momento en la cabeza de un pilote aislado.

6 ANÁLISIS COMPARATIVO DE TODOS LOS MÉTODOS PARA UN CASO ESPECÍFICO

6.1 Introducción

En este sexto capítulo se procederá a analizar los resultados proporcionados por los diferentes métodos propuestos al resolver la problemática de un pilote aislado sometido a cargas laterales. Para el estudio de los diferentes métodos, se analizará un caso en terreno homogéneo arcilloso y otro en terreno homogéneo arenoso.

De todos los métodos propuestos, se considerará el modelo de RSPILE como el que más se aproxime a la realidad ya que el método *p-y* ha sido ampliamente corroborado y comparado con modelos 3D (Meyer y Reese, 1979). A partir de los resultados de éste, podremos corroborar la idoneidad del método semianalítico propuesto por las diferentes normativas españolas.

6.2 Pilote enterrado en un terreno homogéneo arcilloso

Para el caso de un pilote enterrado en un terreno cohesivo, las dimensiones del pilote serán de 25m de longitud y 0.85m de diámetro fabricado de hormigón con una resistencia $f_{ck} = 45\text{MPa}$. Los parámetros de la arcilla serán los correspondientes a una arcilla de consistencia media. A continuación, se muestran en tablas y figuras las características y parámetros necesarios, tanto del pilote como del terreno, para cada método de cálculo.

De las tres normativas, sólo se analizarán los resultados de la guía de Recomendaciones geotécnicas para Obras Marítimas y portuarias (ROM-05) ya que los resultados tanto de desplazamientos como de esfuerzos son menores que los correspondientes del Código Técnico de Edificación (CTE) y de la Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras (GCOC). De esta manera, si se corrobora la idoneidad de la ROM-05, se corroborará la idoneidad del método siguiendo la formulación del CTE y de la GCOC.

6.2.1 Características del terreno y del pilote para el método de Broms

Las características del terreno para el método de Broms se recogen en la **tabla 6.1**.

Consistencia del terreno	Valor de C_u (kPa)	Diámetro del pilote (m)	Módulo k_H (kN/m ³)
Media	80	0.85	6305.88

Tabla 6.1. Parámetros del terreno y del módulo k_H (Broms) a partir de la ecuación (2.7).

En la **figura 6.1** se recogen las características geométricas y propiedades mecánicas del pilote ensayado para el método de Broms

Parámetros del pilote (arcilla media)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia f_{ck}	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (E_p)	31.928	Gpa
Momento de inercia (I_p)	0.0256	m ⁴
Coefficiente β	0.201	1/m
Relación βL	5.029	
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (M_0)	200	kN*m

Figura 6.1. Parámetros del pilote enterrado en una arcilla media (Broms).

6.2.2 Características del terreno y del pilote para el modelo de la ROM-05

Las características del terreno (arcilla media) para el modelo de la ROM-05 se recogen en la **tabla 6.2** y las características geométricas y propiedades mecánicas del pilote ensayado lo hacen en la **figura 6.2**

Consistencia del terreno	Valor de C_u (kPa)
Media	80

Tabla 6.2. Parámetros del terreno (ROM-05).

Parámetros del pilote (arcilla media)		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia fck	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Diámetro equivalente	0.85	m
Longitud enterrada (L)	25	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	25.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica T (ROM-05)	3.180	m
Fuerza aplicada (H)	400	kN
Momento aplicado (Mo)	200	kN*m
Momento total (M)	1532.815	kN*m
Longitud varilla equivalente L* (ROM-05)	2.5440	m
Rigidez horizontal Kh (ROM-05)	25440.361	kN/m
Rigidez al giro Kθ (ROM-05)	154362.253	kN*m

Figura 6.2. Parámetros del pilote enterrado en una arcilla media (ROM-05).

6.2.3 Características del terreno y del pilote para modelo del RSPILE

Las características del terreno (arcilla media) y las características geométricas y mecánicas del pilote se recogen en la **tabla 6.3.** y **6.4.**

Parámetros del terreno (arcilla media)	
Peso específico aparente γ [kN/m ³]	16
Peso específico saturado γ_{SAT} [kN/m ³]	19
Resistencia al corte sin drenaje C_u (kPa)	80
Deformación ϵ_{50}	0.01
Tipo de suelo	Soft Clay soil

Tabla 6.3. Parámetros del terreno (arcilla media) para RSPILE.

Parámetros del pilote (HA-45)	
Longitud (m)	25
Tipo de pilote	Cilíndrico
Diámetro (m)	0.85
Tipo de material	Elástico
Módulo de Young E_P (kPa)	31928000

Tabla 6.4. Parámetros del pilote para RSPILE en arcilla media.

6.2.4 Características del terreno y del pilote para modelo del PLAXIS 2D (Axilsimétrico)

Para el modelo PLAXIS 2D, las características del terreno (arcilla media) se recogen en la **tabla 6.5**.

Parámetros del terreno (arcilla media)	
Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb
Tipo de análisis	No drenado tipo B
Peso específico aparente γ [kN/m ³]	16
Peso específico saturado γ_{SAT} [kN/m ³]	19
Índice de poros e	0.5
Módulo de deformación E (kPa)	5000
Coefficiente de Poisson ν	0.35
Resistencia al corte sin drenaje C_u (kPa)	80

Tabla 6.5. Parámetros del terreno (arcilla media) para PLAXIS 2D.

Las características geométricas y mecánicas del pilote estudiado se recogen en la **tabla 6.6**:

Parámetros del pilote (HA-45) (Elemento <i>Placa</i>)	
Longitud [m]	25
Módulo de deformación E_P [kPa]	31928000
Peso específico del material γ_p [kN/m ³]	25
Tipo de material	Elástico
Diámetro [m]	0.85
Consistencia del terreno	Media
Rigidez axial $E_P A_P$ [kN]	18.12*E6
Rigidez a flexión $E_P I_P$ [kNm ²]	81.81*E4
Peso de la placa w [kN/m ²]	7.65
Espesor de la placa equivalente d_{eq} [m]	0.74
Coefficiente de Poisson ν	0.2

Tabla 6.6. Parámetros del pilote para elemento *placa* (PLAXIS 2D) en una arcilla media.

6.2.5 Características del terreno y del pilote para PLAXIS 2D (Deformación plana)

Las características del terreno (arcilla media) son las de la **tabla 6.5**. Las del pilote para el modelo de PLAXIS 2D en deformación plana se recogen en la **tabla 6.7**:

Parámetros del pilote (HA-45) (Pilote embebido)	
Longitud [m]	25
Módulo de deformación E_p (kPa)	31928000
Peso específico del material γ_p (kN/m ³)	25
Tipo de pilote	Macizo circular
Diámetro (m)	0.85
Resistencia por fuste en cabeza (kN/m)	118.7
Resistencia por fuste en punta (kN/m)	118.7
Resistencia total por punta (kN)	408.6

Tabla 6.7. Parámetros del pilote para elemento pilote embebido (PLAXIS 2D) en arcilla media.

Los valores de la resistencia total del pilote en su punta y por fuste se han determinado a partir de las ecuaciones (3.16) – (3.17).

6.2.6 Resultados

A continuación, se presentan las gráficas que recogen los resultados de desplazamiento lateral, giro, momento flector y esfuerzo cortante (**figuras 6.3 a 6.6**) a lo largo del fuste para una arcilla de consistencia media, un pilote de 25m de longitud y diámetro de 0.85m.

Análisis comparativo de todos los métodos para un caso específico

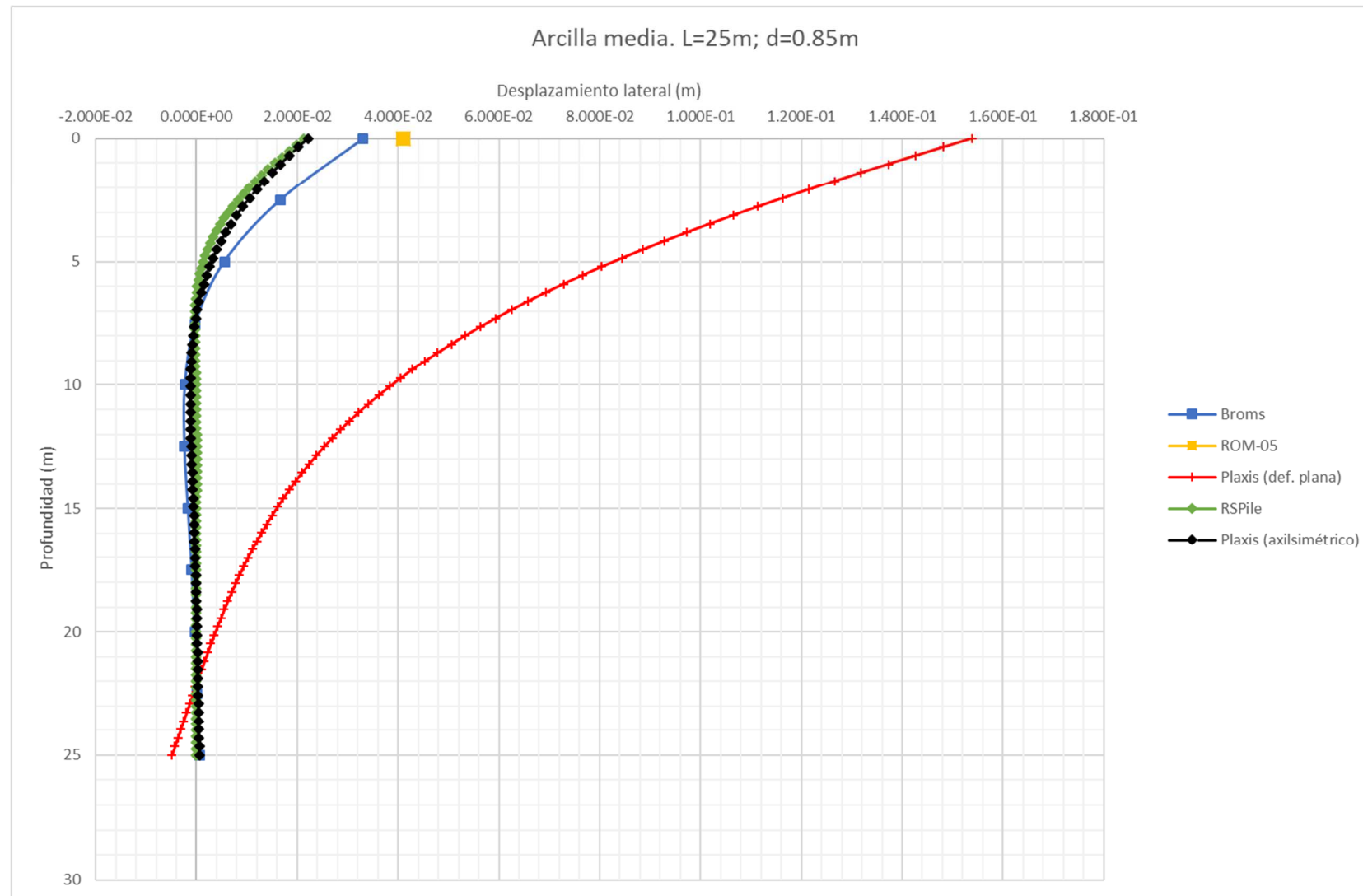
Desplazamiento lateral

Figura 6.3. Desplazamiento lateral según los diferentes métodos estudiados en una arcilla media.

Giro

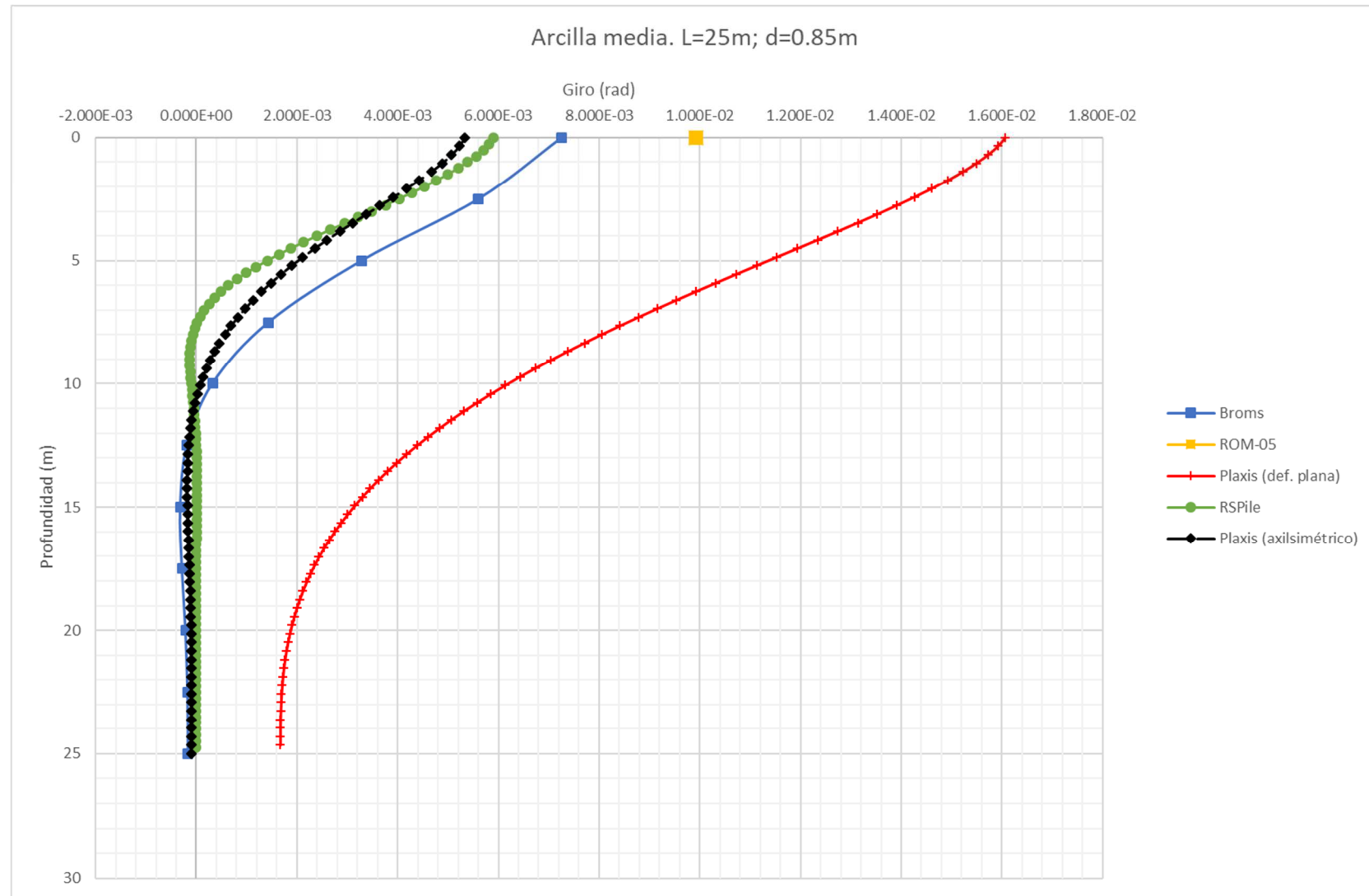


Figura 6.4. Giro según los diferentes métodos estudiados en una arcilla media.

Momento flector

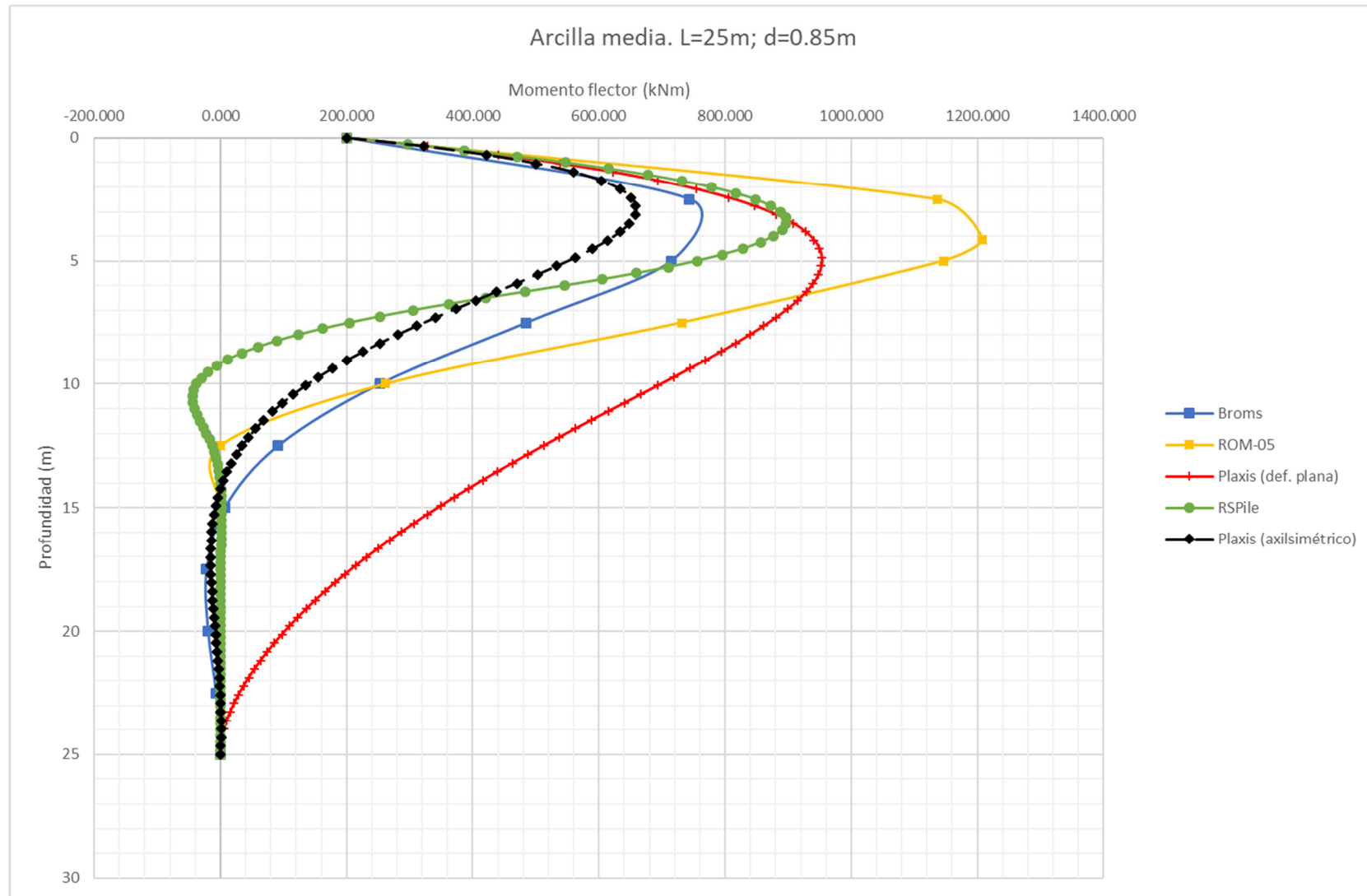


Figura 6.5. Momento flector según los diferentes métodos estudiados en una arcilla media.

Esfuerzo cortante

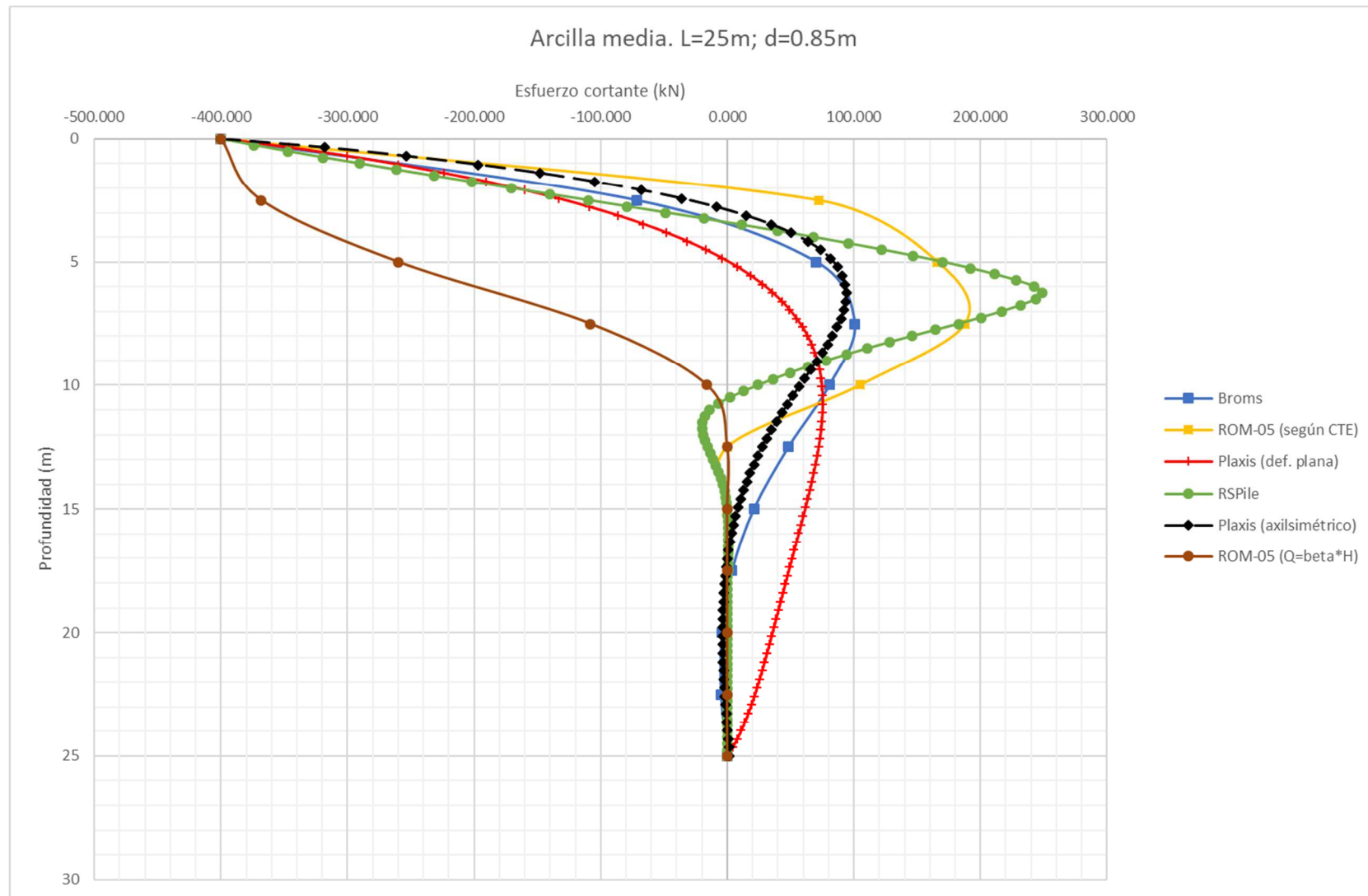


Figura 6.6. Esfuerzo cortante según los diferentes métodos estudiados en una arcilla media.

Comentarios

Del análisis comparativo entre modelos analítico, normativo y numérico en arcilla media, utilizando un pilote de 25m de longitud y diámetro 0.85m, se pueden extraer los siguientes comentarios descartando el modelo PLAXIS 2D en deformación plana

- **Desplazamiento:** Se observa en la **figura 6.3** que el máximo desplazamiento lateral en cabeza es debido al modelo normativo (ROM 05), mientras que el modelo analítico (Broms) es menor que el normativo y mayor que el numérico. Si consideramos que el numérico es el que está más cerca de los medidos en obra, podemos concluir que el modelo de Broms y el normativo, en terrenos arcillosos, están del lado de la seguridad. Se aprecia también que en profundidad los desplazamientos tienden a anularse.
- **Giro:** Puede verse en la **figura 6.4** que el máximo giro en cabeza es representado por el modelo normativo (ROM 05). El modelo analítico o Broms se sitúa entre el normativo y numérico. En este caso se puede decir que las conclusiones son similares a las obtenidas en el apartado de desplazamiento lateral del pilote.
- **Momento flector:** Según la **figura 6.5**, el modelo normativo muestra el máximo momento positivo. En cuanto al modelo analítico, podemos decir que el máximo momento positivo se sitúa entre los dos modelos numéricos (RSPILE > BROMS > PLAXIS 2D). Si asumimos que los modelos numéricos se asemejan a los medidos en obra, se concluye que la envolvente de momentos de la norma ROM-05 está muy del lado de la seguridad (máximo) y que el analítico se ajusta mejor a las leyes que dibujan los métodos numéricos (RSPILE y PLAXIS 2D). En profundidad, y para todos los métodos, los momentos flectores tienden a cero.
- **Esfuerzo cortante:** De acuerdo con la **figura 6.6**, se observa que el modelo de RSPILE presenta el mayor cortante positivo. El modelo analítico (Broms) se ajusta bastante bien al modelo de elementos finitos axilsimétrico PLAXIS 2D. En cuanto a la norma ROM-05 (según criterio del CTE), el máximo cortante positivo se sitúa entre los modelos de PLAXIS 2D, Broms y RSPILE (RSPILE > ROM-05 con criterio del CTE > Broms y PLAXIS 2D). Bajo la suposición de que el modelo numérico de RSPILE se asemeja más a la realidad, podemos concluir que el máximo cortante positivo de la norma ROM-05 (según criterio del CTE) no está del lado de la seguridad.
- **Esfuerzo cortante (ROM-05 con $Q=H*M/M_0$):** La envolvente representada al utilizar la formulación propuesta por la ROM-05 no produce valores positivos del esfuerzo cortante. La no existencia de un valor máximo positivo se debe a la forma presentada en la **figura 2.8**, para calcular el coeficiente $\beta=M/M_0$: este coeficiente vale la unidad en cabeza y desciende hasta hacerse nulo para un valor de $z/z_0=3$.

En cuanto a los métodos aplicados y a la condición del problema (axilsimetría y deformación plana), modelo de comportamiento (elastoplástico) y tipo de elemento finito (*pilote embebido* y *placa*), las conclusiones son las siguientes al compararlos con el modelo de RSPILE:

- **PLAXIS 2D en deformación plana:**
 - o Es evidente que utilizando el elemento finito *pilote embebido*, el modelo de PLAXIS 2D no se adapta, en absoluto, a la realidad en términos de desplazamientos. Los valores del desplazamiento lateral y el giro en la cabeza del pilote son, respectivamente, el cuádruple y el triple de los establecidos según el modelo del *software* RSPILE.
 - o En términos de esfuerzos, el modelo del PLAXIS 2D en deformación plana ofrece una distribución del momento flector mayor y siempre positiva. En la distribución del esfuerzo cortante, el valor máximo positivo proporcionado por este método es menor al establecido en el modelo RSPILE. Aunque los modelos basados en el MEF modelan la deformación del terreno utilizando el módulo de deformación E y el coeficiente de Poisson ν , al no disponer de resultados medidos en obra, no podremos concluir si los esfuerzos son más correctos según la formulación de PLAXIS o de RSPILE.
- **PLAXIS 2D en axilsimétrico:**
 - o En este caso, los desplazamientos laterales y giros proporcionados por este modelo se ajustan mejor a los del RSPILE que los del modelo de PLAXIS 2D en deformación plana. La diferencia entre el desplazamiento y el giro en cabeza para el caso estudiado según ambos métodos es de 0.7mm en el desplazamiento y de 0.6 miliradianes en el giro.

Podríamos concluir que el modelo de PLAXIS 2D en condiciones axilsimétricas no es un mal modelo para calcular giros y desplazamientos.

- Los momentos flectores y esfuerzos cortantes proporcionados por este método son menores que los del RSPILE. Al igual que se ha comentado anteriormente, aunque los modelos según el MEF tienen en cuenta la deformabilidad del terreno a través del módulo de deformación E y del coeficiente de Poisson ν , como no disponemos de resultados medidos en obra, no podemos verificar cuál es la mejor distribución de cada esfuerzo. Por otra parte, se observa que los momentos y cortantes se asemejan a la distribución del método analítico de Broms.

- **Método analítico de Broms:**

- Los desplazamientos y giros proporcionados por este método son superiores a los del RSPILE. La diferencia entre el desplazamiento y el giro en cabeza según ambos métodos (RSPILE – Broms) es de 12mm en el desplazamiento y de 1.3 miliradianes en el giro. Esta diferencia es mayor que en el caso de RSPILE – PLAXIS 2D en axilsimétrico.
- Con los momentos flectores y cortantes ocurre algo parecido que con el modelo del PLAXIS 2D en axilsimétrico: los valores máximos son menores que los de RSPILE, pero éstos son mayores que los proporcionados por PLAXIS 2D. Para el caso del esfuerzo cortante, la diferencia entre el máximo cortante arrojado por dicho método y el de PLAXIS 2D es mucho menor que la diferencia en el máximo momento flector (existe mayor similitud entre el modelo axilsimétrico de PLAXIS 2D y el de Broms para el cortante que para el momento flector).

- **Método semianalítico de las normativas (ROM-05):**

Este método nos interesa mucho ya que uno de los objetivos recogidos en el apartado 1.3 es el de corroborar su idoneidad:

- Los desplazamientos laterales son mayores que los proporcionados por el resto de los métodos, exceptuando los del PLAXIS 2D en deformación plana. La diferencia entre el desplazamiento en cabeza según éste método y el de RSPILE es de 2cm, prácticamente el doble.
- Con los giros pasa lo mismo que con los desplazamientos, el método normativo proporciona un giro en cabeza muy superior al del RSPILE. La diferencia entre ambos métodos en la cabeza del pilote es de 4 miliradianes.
- En el caso del momento flector los valores proporcionados son mucho mayores que los de RSPILE. La diferencia entre el máximo momento flector para el método normativo y para el de RSPILE es de 310 kNm.
- Para el esfuerzo cortante y según el criterio del CTE, el máximo cortante positivo es inferior al de RSPILE, lo que provocaría que no estuviese del lado de la seguridad si consideramos que se asemeja más a la realidad el modelo numérico de RSPILE. La diferencia entre el máximo cortante para el método normativo y para el de RSPILE es de 60 kN. Por otro lado, la envolvente utilizando la formulación del cortante como en la norma ROM-05 donde $Q=H*\beta$ ($\beta = M/M_0$) sólo arroja valores negativos del esfuerzo cortante (v. **figura 2.8**), por lo que es posible que exista una errata en la formulación recogida en la ROM-05 (art. 3.6.9.2.1). Se propone como solución la de modelizar el cortante según el criterio que se aplica en el CTE: $Q = -\frac{\Delta M}{\Delta z}$.

6.3 Pilote enterrado en un terreno homogéneo arenoso

Se estudiará en este caso un pilote enterrado en un terreno granular, de 15m de longitud y 0.85m de diámetro fabricado de hormigón con una resistencia $f_{ck} = 45\text{MPa}$.

Los parámetros del suelo serán los correspondientes a una arena de compacidad media. A continuación, se muestran en tablas y figuras las características y parámetros necesarios, tanto del pilote como del terreno, para cada método de cálculo.

A partir de los resultados de los modelos numéricos y, en especial, del modelo de RSPILE que ha sido ampliamente corroborado y comparado con modelos 3D (Meyer y Reese, 1979); se podrá corroborar la idoneidad del método semianalítico propuesto por las diferentes normativas españolas

6.3.1 Características del terreno y del pilote para el método de Broms

Las características del terreno (arena media) para el método de Broms se recogen en la **tabla 6.8**. En la **figura 6.7** se recogen las características geométricas y propiedades mecánicas del pilote ensayado para el método de Broms

Compacidad del terreno	Peso específico aparente γ [kN/m ³]	Peso específico saturado γ_{SAT} [kN/m ³]	Ángulo de rozamiento interno ϕ (°)	N_{SPT}	Coefficiente A	Coefficiente de reacción n_H (kN/m ³)
Media	20	23	35	26	860	12740.74

Tabla 6.8. Parámetros terreno granular para arena media a partir de la ecuación (2.13).

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia f_{ck}	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.299	m
Relación L/T	6.525	
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m

Figura 6.7. Parámetros del pilote enterrado en una arena media (Broms).

6.3.2 Características del terreno y del pilote para el modelo normativo

Las características del terreno (arena media) son las mismas que las recogidas en la **tabla 6.8**. Las características geométricas y propiedades mecánicas del pilote ensayado lo hacen en la **figura 6.8**

Parámetros del pilote		
¿Tipo de sección? (Cir/Cua)	cir	
Material (A/H)	h	
Resistencia f_{ck}	45	MPa
¿Cabeza libre o empotrada? (L/E)	L	
Diámetro	0.85	m
Longitud enterrada (L)	15	m
Longitud libre (e)	0.5	m
Longitud capa blanda	0	m
Longitud L1	0.50	m
Longitud L2	15.00	m
Módulo de elasticidad (Ep)	31.928	Gpa
Momento de inercia (Ip)	0.0256	m ⁴
Longitud elástica (T)	2.299	m
Fuerza aplicada (H)	400.000	kN
Momento aplicado (Mo)	200.000	kN*m
Momento total (M)	1152.816	kN*m
Longitud varilla equivalente (L*)	1.8820	m
Rigidez horizontal Kh	67335.807	kN/m
Rigidez al giro Kθ	213524.988	kN*m

Figura 6.8. Parámetros del pilote enterrado en una arena media (Normativas).

6.3.3 Características del terreno y del pilote para modelo del RSPILE

Las características del terreno (arena media) y las características geométricas y mecánicas del pilote se recogen en la **tabla 6.9.** y **6.10.**

Parámetros del terreno (arena media)	
Peso específico aparente γ [kN/m ³]	20
Peso específico saturado γ_{SAT} [kN/m ³]	23
Ángulo de rozamiento del terreno. [°]	35
Coefficiente k_{py} [kN/m ³]	24400
Tipo de suelo	Sand

Tabla 6.9. Parámetros del terreno (arena media) para RSPILE

Parámetros del pilote (HA-45)	
Longitud (m)	15
Tipo de pilote	Cilíndrico
Diámetro (m)	0.85
Tipo de material	Elástico
Módulo de Young E_P (kPa)	31928000

Tabla 6.10. Parámetros del pilote para RSPILE en arena media.

6.3.4 Características del terreno y del pilote para modelo del PLAXIS 2D (Axilsimétrico)

Para el modelo PLAXIS 2D, las características del terreno (arena media) se recogen en la **tabla 6.11.**

Parámetros del terreno (arena media)	
Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb
Tipo de análisis	Drenado
Peso específico aparente γ [kN/m ³]	20
Peso específico saturado γ_{SAT} [kN/m ³]	23
Índice de poros e	0.3
Módulo de deformación E [kPa]	20*E3
Coefficiente de Poisson ν	0.35
Ángulo de rozamiento del terreno. [°]	35
Ángulo de dilatación del terreno. [°]	5

Tabla 6.11. Parámetros del terreno (arena media) para PLAXIS 2D.

Las características geométricas y mecánicas del pilote estudiado se recogen en la **tabla 6.12**:

Parámetros del pilote (HA-45) (Elemento Placa)	
Longitud [m]	15
Módulo de deformación E_P [kPa]	31928000
Peso específico del material γ_p [kN/m ³]	25
Tipo de material	Elástico
Diámetro [m]	0.85
Consistencia del terreno	Media
Rigidez axial $E_P A_P$ [kN]	18.12 * E6
Rigidez a flexión $E_P I_P$ [kNm ²]	81.81 * E4
Peso de la placa w [kN/m ²]	4.25
Espesor de la placa equivalente d_{eq} [m]	0.74
Coefficiente de Poisson ν	0.2

Tabla 6.12. Parámetros del pilote para elemento *placa* (PLAXIS 2D) en una arena media.

6.3.5 Características del terreno y del pilote para PLAXIS 2D (Deformación plana)

Las características del terreno (arena media) son las mismas que las recogidas en la **tabla 6.11**. Las del pilote para el modelo de PLAXIS 2D en deformación plana se recogen en la **tabla 6.13**:

Parámetros del pilote (HA-45) (Pilote embebido)	
Longitud [m]	15
Módulo de deformación E_P (kPa)	31928000
Peso específico del material γ_p (kN/m ³)	25
Tipo de pilote	Macizo circular
Diámetro (m)	0.85
Resistencia por fuste en cabeza (kN/m)	140.2
Resistencia por fuste en punta (kN/m)	140.2
Resistencia total por punta (kN)	3985

Tabla 6.13. Parámetros del pilote para elemento pilote embebido (PLAXIS 2D) en arena media.

Los valores de la resistencia total del pilote en su punta y por fuste se han determinado a partir de las ecuaciones (3.11) a (3.15).

6.3.6 Resultados

A continuación, se presentan las gráficas que recogen los resultados de desplazamiento lateral, giro, momento flector y esfuerzo cortante (**figuras 6.9 a 6.12**) a lo largo del fuste para una de compacidad media, un pilote de 15m de longitud y diámetro de 0.85m.

Análisis comparativo de todos los métodos para un caso específico

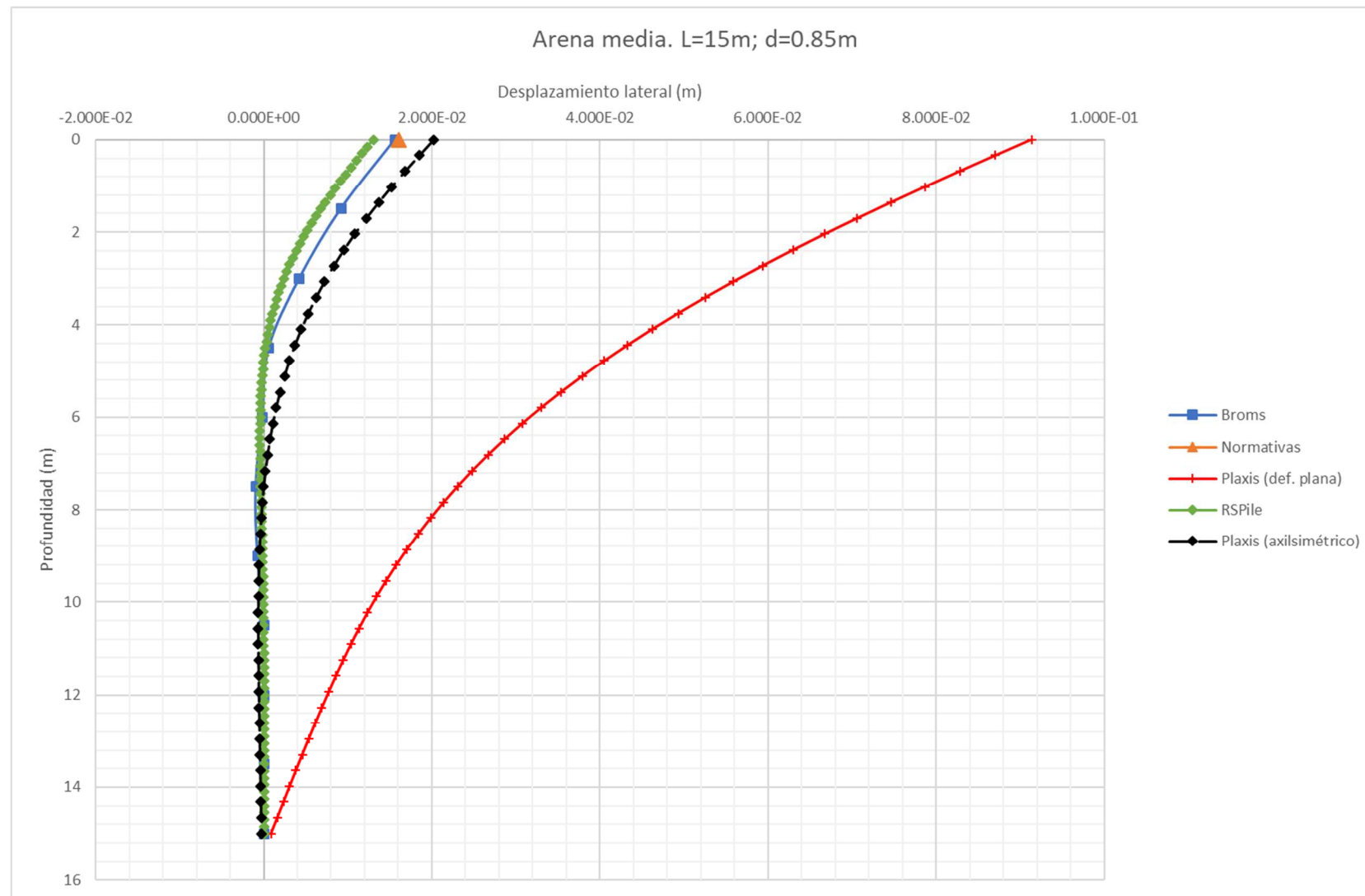
Desplazamiento lateral

Figura 6.9. Desplazamiento lateral según los diferentes métodos estudiados en una arena media.

Giro

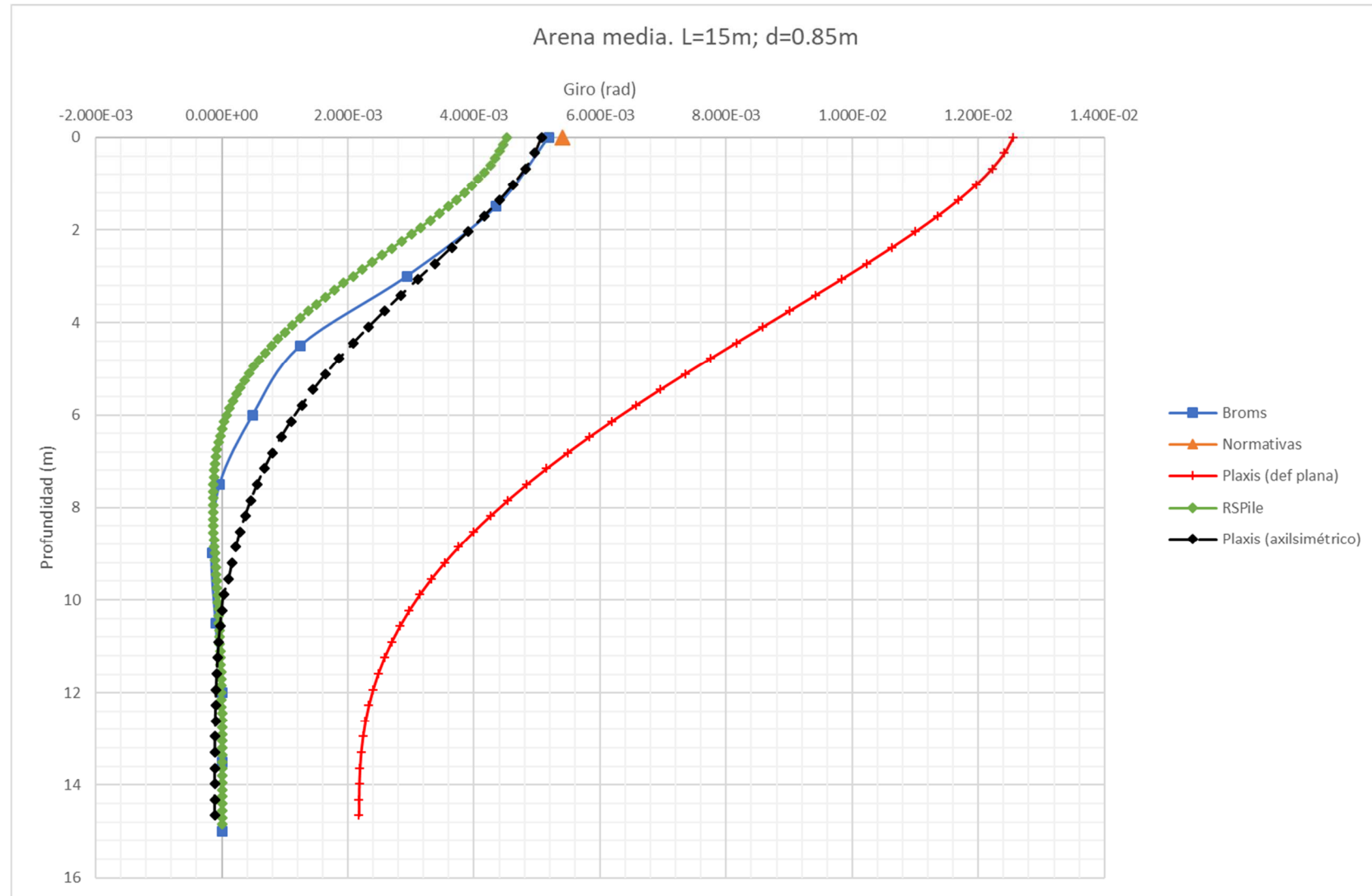


Figura 6.10. Giro según los diferentes métodos estudiados en una arena media.

Momento flector

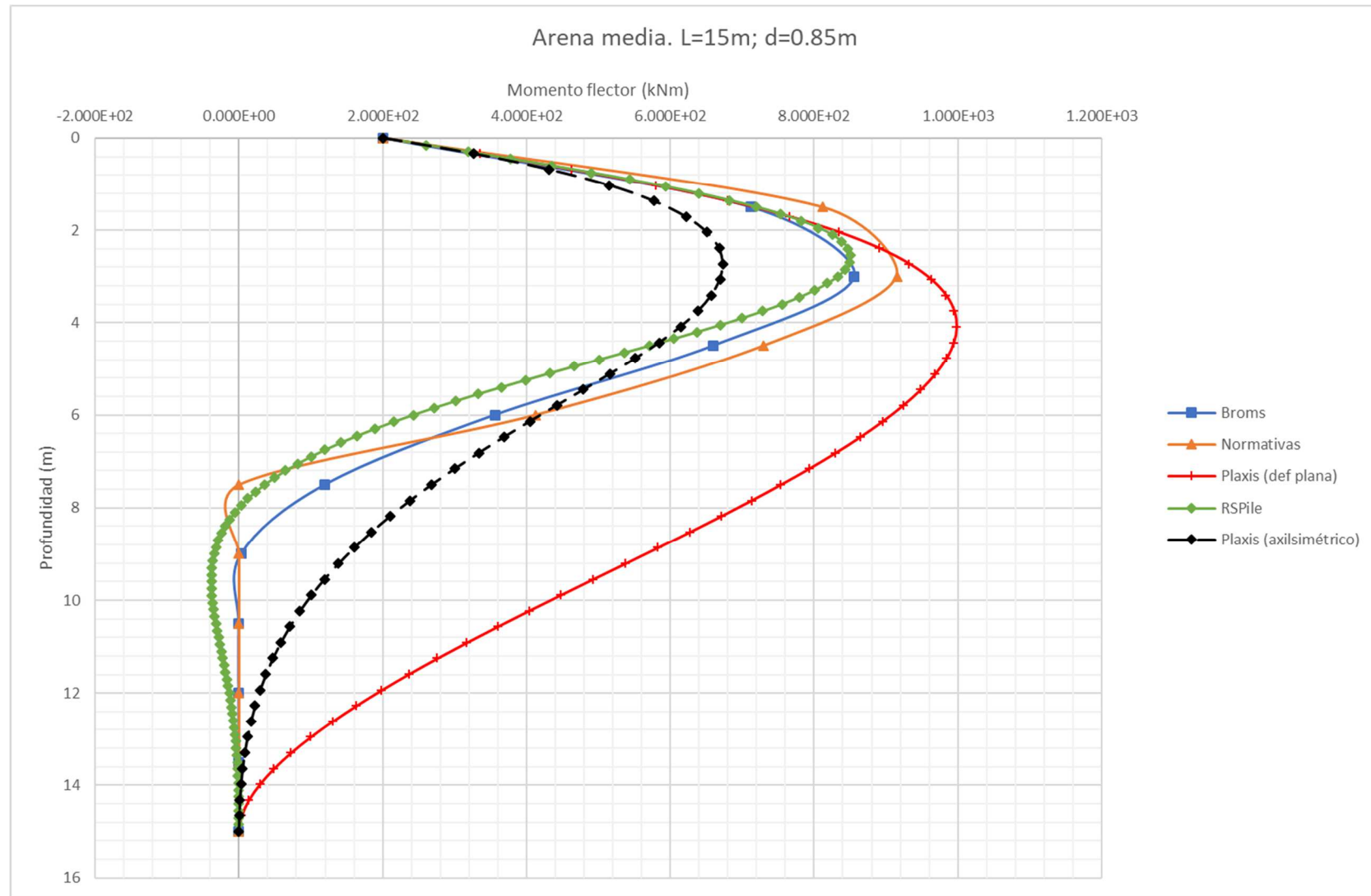


Figura 6.11. Momento flector según los diferentes métodos estudiados en una arena media.

Esfuerzo cortante

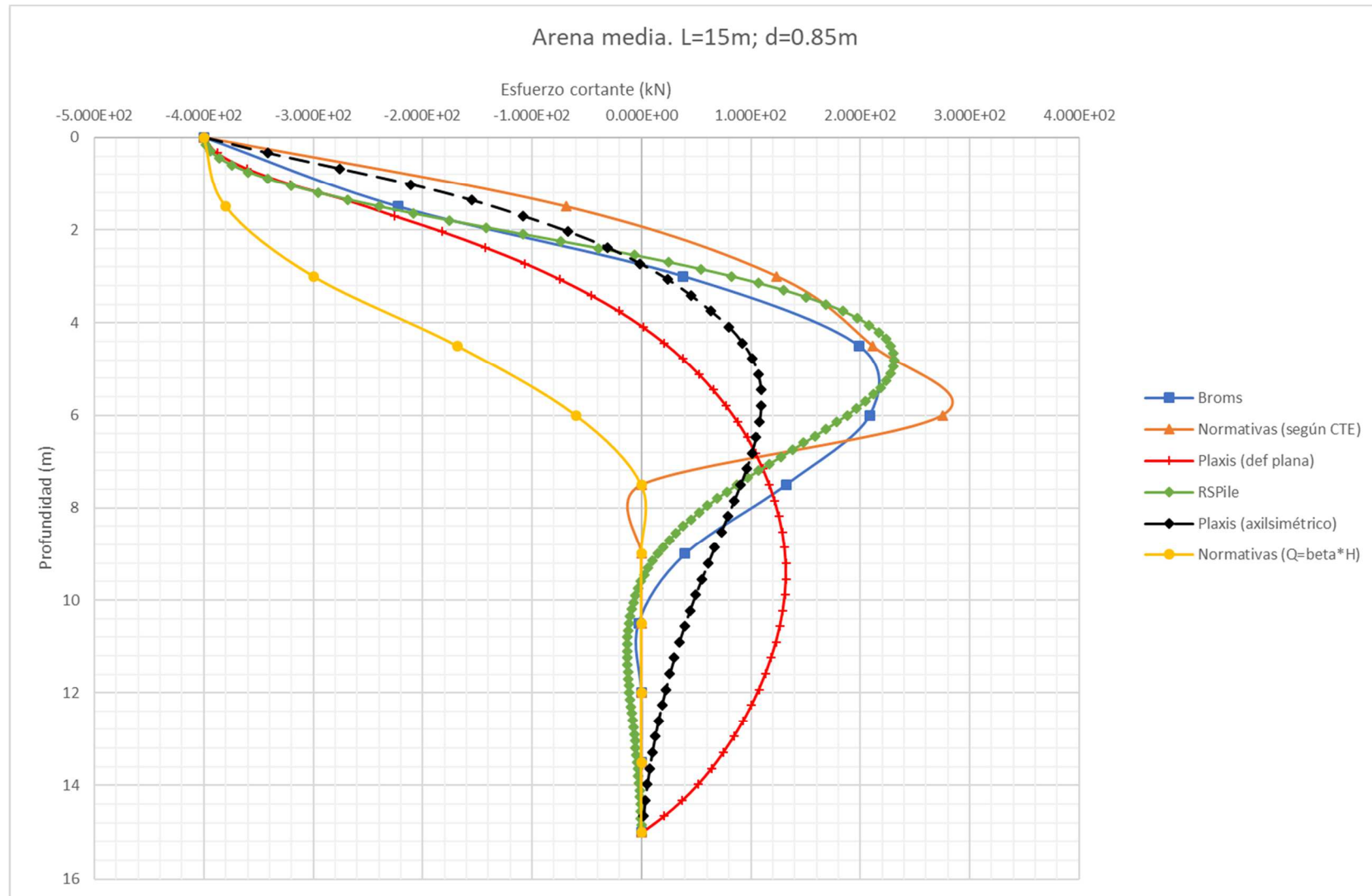


Figura 6.12. Esfuerzo cortante según los diferentes métodos estudiados en una arena media.

Comentarios

Del análisis comparativo entre modelos analítico, normativo y numérico en arena media, utilizando un pilote de 15m de longitud y diámetro 0.85m, se pueden extraer los siguientes comentarios descartando el modelo PLAXIS 2D en deformación plana

- **Desplazamiento:** Se observa en la **figura 6.9** que el máximo desplazamiento lateral en cabeza es debido al modelo axilsimétrico de PLAXIS 2D. El valor del modelo normativo es muy parecido al del método analítico de Broms, situándose ambos entre los valores de los métodos numéricos (PLAXIS 2D > Broms y Normativas > RSPILE). Si consideramos que el modelo numérico de RSPILE es el que está más cerca de los medidos en obra, podemos concluir que el modelo de Broms, el normativo y el axilsimétrico de PLAXIS 2D, en terrenos granulares, están del lado de la seguridad. Se aprecia también que en profundidad los desplazamientos tienden a anularse.
- **Giro:** Puede verse en la **figura 6.10** que el máximo giro en cabeza es representado por el modelo normativo. Sin embargo, el valor del giro en cabeza según el modelo analítico (Broms) y el modelo axilsimétrico de PLAXIS 2D son muy parecidos a éste; siendo el menor de ellos el giro proporcionado por RSPILE. Como todos los modelos proporcionan un valor superior al de RSPILE, podríamos decir, igualmente, que todos los modelos se encuentran del lado de la seguridad.
- **Momento flector:** Según la **figura 6.11**, el modelo normativo muestra el máximo momento positivo. En cuanto al modelo analítico, el máximo momento positivo es muy parecido al del modelo numérico de RSPILE; mientras que el del modelo de PLAXIS 2D en axilsimétrico es muy inferior al resto. Si asumimos que el modelo de RSPILE es que más se asemeja a la realidad al estar ampliamente corroborado, se concluye que la envolvente de momentos de las normativas está del lado de la seguridad (máximo) y que el analítico es el que mejor se ajusta a la distribución que dibuja el método de RSPILE. Sin embargo, la envolvente del modelo de PLAXIS 2D no se encuentra del lado de la seguridad y no sería recomendable utilizarlo. En profundidad, y para todos los métodos, los momentos flectores tienden a cero.
- **Esfuerzo cortante:** De acuerdo con la **figura 6.12**, se observa que el modelo normativo que sigue el criterio del CTE presenta el mayor cortante positivo. El modelo analítico (Broms) se ajusta bastante bien al modelo numérico de RSPILE, proporcionando un máximo cortante positivo ligeramente inferior. En cuanto a PLAXIS 2D, el máximo cortante positivo es el mínimo de todos (Normativas > RSPILE > Broms > PLAXIS 2D). Bajo la suposición de que el modelo numérico de RSPILE se asemeja más a la realidad, podemos concluir que la envolvente de cortantes de las normativas está del lado de la seguridad (máximo), que la envolvente de Broms es la que mejor se ajusta a la de RSPILE y que, la distribución de PLAXIS 2D, no se encuentra del lado de la seguridad.
- **Esfuerzo cortante (normativas con $Q=H*M/M_0$):** La envolvente representada al utilizar la formulación propuesta por la ROM-05, en su artículo 3.6.9.2.1, no presenta cortantes positivos. La no existencia de estos esfuerzos positivos se debe a la forma presentada en la **figura 2.8**. para calcular el coeficiente $\beta=M/M_0$: este coeficiente vale la unidad en cabeza y descende hasta hacerse nulo para un valor de $z/z_0=3$.

En cuanto a los métodos aplicados y a la condición del problema (axilsimetría y deformación plana), modelo de comportamiento (elastoplástico) y tipo de elemento finito (*pilote embebido* y *placa*), las conclusiones son las siguientes al compararlos con el modelo de RSPILE:

- **PLAXIS 2D en deformación plana:**
 - o Los desplazamientos laterales y giros utilizando el elemento finito *pilote embebido* vuelven a ser desproporcionados si lo comparamos con el modelo de RSPILE. Los valores del desplazamiento lateral y el giro en la cabeza del pilote son, respectivamente, el séptuple y el triple de los establecidos según el modelo del *software* RSPILE.
 - o En términos de esfuerzos, el modelo del PLAXIS 2D en deformación plana ofrece una distribución del momento flector mayor y siempre positiva. En la distribución del esfuerzo cortante, el valor máximo positivo proporcionado por este método es menor al establecido en el modelo RSPILE. Aunque los modelos basados en el MEF modelan la deformación del terreno utilizando el módulo de deformación E y el coeficiente de Poisson ν , al no

disponer de resultados medidos en obra, no podremos concluir si los esfuerzos son más correctos según la formulación de PLAXIS o de RSPILE.

- **PLAXIS 2D en axilsimétrico:**

- Los desplazamientos laterales y giros proporcionados por el modelo del PLAXIS 2D en axilsimétrico se ajustan mejor a los del RSPILE que los de PLAXIS 2D en deformación plana. La diferencia entre el desplazamiento y el giro en cabeza para el caso estudiado según ambos métodos es de 7mm en el desplazamiento y de 0.5 miliradianes en el giro. Podríamos concluir que el modelo de PLAXIS 2D en condiciones axilsimétricas no es un mal modelo para calcular giros y desplazamientos.
- Los momentos flectores y esfuerzos cortantes proporcionados por este método son menores que los del RSPILE. Al igual que se ha comentado anteriormente, aunque los modelos según el MEF tienen en cuenta la deformabilidad del terreno a través del módulo de deformación E y del coeficiente de Poisson ν , como no disponemos de resultados medidos en obra, no podemos verificar cuál es la mejor distribución de cada esfuerzo.

- **Método analítico de Broms:**

- Los desplazamientos y giros proporcionados por este método se ajustan bien a los resultados del RSPILE, aunque sean superiores. La diferencia entre el desplazamiento y el giro en cabeza según ambos métodos (RSPILE y Broms) es de 2.5mm en el desplazamiento y de 0.66 miliradianes.
- Con los momentos flectores y cortantes, las distribuciones según el método de Broms y el del RSPILE se asemejan, siendo los valores máximos muy parecidos. La diferencia entre el momento flector máximo del método de Broms (mayor) y el de RSPILE es de sólo 6 kNm, mientras que en el esfuerzo cortante es de 22.5 kN. En este caso, es mayor el esfuerzo cortante del RSPILE.

- **Método semianalítico normativo:**

Como se ha comentado anteriormente, este método nos interesa mucho ya que uno de los objetivos recogidos en el apartado 1.3 es el de corroborar su idoneidad:

- Los desplazamientos laterales en la cabeza son muy parecidos a los del método analítico de Broms, siendo la diferencia de 3mm con respecto a los proporcionados por el modelo del RSPILE.
- El giro en la cabeza según este método representa el máximo de todos los recogidos. La diferencia con el giro en cabeza según el modelo de RSPILE es de, aproximadamente, 1mrad.
- En el caso del momento flector, los valores proporcionados son mayores que los de RSPILE, pero la distribución de éste es similar. La diferencia entre el máximo momento flector para el método normativo y para el de RSPILE es de 65 kNm.
- Para el esfuerzo cortante, las envolventes de los cortantes no se asemejan como pasaba con los momentos flectores. El máximo cortante positivo según el criterio del CTE es superior al de RSPILE, siendo la diferencia entre ambos valores de 44 kN. Por otro lado, la envolvente utilizando la formulación del cortante como $Q=H*\beta$ ($\beta = M/M_0$) sólo arroja valores negativos del esfuerzo cortante (v. **figura 2.8**), por lo que es posible que exista una errata en la formulación recogida en la ROM-05 (art. 3.6.9.2.1). Se propone como solución aplicar en la norma ROM-05 el criterio del CTE: $Q = -\frac{\Delta M}{\Delta z}$.

7 RESUMEN Y CONCLUSIONES

7.1 Introducción

Diversos métodos se han propuesto para analizar la interacción suelo-estructura y resolver el problema de un pilote cargado lateralmente; desde métodos analíticos, hasta otros más avanzados que tienen en cuenta la influencia de las deformaciones plásticas en el comportamiento del terreno. Para tratar este tema, en España existe una normativa de obligado cumplimiento para las obras de edificación y dos guías con recomendaciones constructivas para obras de carreteras y para obras marítimas.

Con el objeto de estudiar las diferencias existentes entre los diferentes métodos de cálculo de los desplazamientos laterales, en este TFG se verificará si estos métodos, incluidos los propuestos por la normativa, se encuentran dentro de los rangos de seguridad establecidos. Para ello, se han utilizado como referencia modelos numéricos más completos que tienen en cuenta el problema de interacción terreno-pilote y modelo de comportamiento del terreno.

7.2 Conclusiones del capítulo 4.

Se comentan a continuación, las diferencias y conclusiones observadas para terrenos arcillosos y arenosos entre los modelos analítico o de Broms y el normativo.

- En referencia a la longitud, el método de Broms arroja menores desplazamientos en cabeza que el método normativo para una misma longitud del pilote. Por otro lado, los valores máximos del momento flector y del cortante también corresponden al método normativo, aunque en arenas la diferencia es mínima. La influencia de la longitud del pilote no es significativa para ambos métodos y, por tanto, podemos concluir por tanto que, tanto en arenas como en arcillas, la longitud del pilote no es un parámetro determinante para ninguno de los dos métodos cuando un pilote está sometido a una carga lateral y a un momento en cabeza.
- En cuanto al diámetro, para un mismo valor, el método de Broms arroja menores desplazamientos en cabeza que el método normativo. Por otro lado, los valores máximos del momento flector corresponden al método normativo. Sin embargo, para el esfuerzo cortante existen diferencias según el tipo de terreno: mientras que en terreno granular la diferencia entre ambos métodos es muy pequeña, en arcillas el máximo cortante positivo corresponde al método normativo que sigue el criterio del CTE (ROM-05). La influencia del diámetro es importante en ambos métodos y podemos concluir que, tanto en arenas como en arcillas, el diámetro del pilote sí es un parámetro determinante tanto para el método de Broms como para el método normativo cuando un pilote está sometido a una carga lateral y a un momento en cabeza.
- Con respecto a la consistencia o compacidad del terreno, el método de Broms arroja menores desplazamientos en cabeza que el método normativo para una misma consistencia/compacidad. Por otro lado, los valores máximos del momento flector corresponden al método normativo (ROM-05). Sin embargo, para el esfuerzo cortante existen diferencias según el tipo de terreno: mientras que en terreno granular la diferencia entre ambos métodos es pequeña, en arcillas el máximo cortante positivo corresponde al método normativo que sigue el criterio del CTE (ROM-05). La influencia de la consistencia/compacidad del terreno es mucho más importante que la del diámetro en términos de desplazamientos para ambos métodos. Podemos concluir, por tanto, que la consistencia de la arcilla o la compacidad de la arena es un parámetro determinante en sendos modelos de análisis cuando un pilote está sometido a una carga lateral y un momento en cabeza.
- En cuanto a la presencia del NF en arenas, el método de Broms arroja menores desplazamientos en cabeza y momentos flectores que el método normativo para una misma situación de la arena. En el caso de los esfuerzos cortantes, la diferencia entre el máximo cortante positivo de uno y otro método es mínima. Podemos concluir, por tanto, que la existencia del freático es un parámetro de cierta importancia en sendos modelos de análisis cuando un pilote se encuentra bajo una carga lateral y un momento en cabeza.

- Finalmente, en cuanto al tipo de material del pilote, el método de Broms arroja menores desplazamientos en cabeza que el método normativo para un mismo tipo de material. Por otro lado, los valores máximos del momento flector y del cortante positivo según criterio del CTE corresponden al método normativo. La influencia del tipo de material del pilote es importante en términos del momento flector y de los desplazamientos, aunque esta influencia es menor que la de la consistencia/compacidad del terreno en términos de estos últimos. Podemos concluir, por tanto que el tipo de material del pilote es un parámetro determinante, tanto en arena como en arcilla, para ambos métodos cuando un pilote está sometido a una carga lateral y un momento en cabeza.

7.3 Conclusiones del capítulo 5.

Se comentan a continuación, las diferencias y conclusiones observadas para terrenos arcillosos y arenosos entre los modelos numéricos de RSPILE y PLAXIS 2D.

- En referencia a la longitud, el modelo de RSPILE arroja menores desplazamientos en cabeza que el modelo de PLAXIS 2D para una misma longitud del pilote. En el caso de los giros, depende del tipo de terreno: en terreno cohesivo el giro en cabeza es menor según PLAXIS 2D, mientras que en terreno granular es menor según RSPILE. Por otro lado, los valores máximos del momento flector y del cortante positivo corresponden al modelo de RSPILE. La influencia de la longitud del pilote es insignificante para ambos modelos y, por tanto, podemos concluir por tanto que, tanto en arenas como en arcillas, la longitud del pilote no es un parámetro determinante para ninguno de los dos modelos cuando un pilote está sometido a una carga lateral y a un momento en cabeza.
- En cuanto al diámetro, el modelo de RSPILE arroja menores desplazamientos en cabeza que el modelo de PLAXIS 2D para un mismo diámetro. Por otro lado, los valores máximos del momento flector y del cortante positivo corresponden al modelo de RSPILE. La influencia del diámetro es importante en ambos modelos y podemos concluir que, tanto en arenas como en arcillas, el diámetro del pilote sí es un parámetro determinante para ambos modelos cuando un pilote está sometido a una carga lateral y a un momento en cabeza.
- Para el modelo del RSPILE, la consistencia o compacidad del terreno juega un papel fundamental ya que el coeficiente k_{py} o de la deformación ϵ_{50} dependen directamente de ésta característica. En el modelo del PLAXIS 2D, el papel de la consistencia es mucho menos importante. Por ejemplo, en los desplazamientos en cabeza: mientras que en el modelo de PLAXIS 2D la diferencia no es tan acusada al pasar de un terreno peor a otro mejor, dicha diferencia sí la es en el modelo de RSPILE. Por otro lado, los valores máximos del momento flector y del cortante positivo corresponden al modelo de RSPILE. La influencia de la consistencia/compacidad del terreno es mucho más importante que la del diámetro para el modelo de RSPILE. Se concluye, por tanto, que la consistencia de la arcilla o la compacidad de la arena es un parámetro determinante para dicho modelo de análisis cuando un pilote está sometido a una carga lateral y un momento en cabeza. Para el modelo del PLAXIS 2D, su contribución es relevante, pero no se equipara al diámetro (parámetro con mayor influencia en dicho método).
- En cuanto a la presencia del NF en arenas, el modelo de RSPILE arroja menores desplazamientos en cabeza que el modelo de PLAXIS 2D para una misma situación de la arena. Por otro lado, los valores máximos del momento flector y del cortante positivo corresponden al modelo de RSPILE. La influencia de la presencia del NF no es tan relevante en ambos modelos, aunque las diferencias en los resultados para un mismo modelo son más acusadas en el RSPILE que en el PLAXIS 2D. Podemos concluir, por tanto, que la presencia del freático es un parámetro de cierta relevancia en sendos modelos para el cálculo de los desplazamientos y de los esfuerzos, pero su papel es más destacado en el modelo de diferencias finitas RSPILE que en el modelo de elementos finitos PLAXIS 2D cuando se aplica una carga lateral y un momento en la cabeza de un pilote aislado.
- Finalmente, en cuanto al tipo de material del pilote, para el modelo del PLAXIS 2D, este parámetro juega un papel fundamental, en términos de desplazamientos, ya que depende directamente de éste a través de la rigidez axial ($E_p A_p$) y a flexión ($E_p I_p$). En el modelo del RSPILE, el papel de las rigideces es menos importante para los desplazamientos, pero juega un papel fundamental en cuanto a los esfuerzos. Por otro lado, los valores máximos del momento flector y del cortante positivo corresponden al modelo de RSPILE. La influencia del tipo de material del pilote es importante en términos de los

esfuerzos para un modelo y en términos de los desplazamientos para otro. Podemos concluir, por tanto, que el tipo de material del pilote es un parámetro determinante, tanto en arena como en arcilla, para ambos modelos cuando un pilote está sometido a una carga lateral y un momento en cabeza.

7.4 Conclusiones del capítulo 6.

Se comentan a continuación las diferencias y conclusiones observadas entre todos los modelos: analítico, normativo y numérico cuando se aplican a un caso específico.

- En referencia a los desplazamientos laterales, el modelo de RSPILE es el que arroja menor desplazamiento lateral en cabeza, tanto en arcilla como en arena. Todos los demás métodos producen un desplazamiento de la cabeza mayor y, por tanto, estarían del lado de la seguridad si consideramos que el modelo numérico de RSPILE es el real o con datos medidos en obra. El modelo de PLAXIS 2D en condiciones de deformación plana produce unos valores de desplazamiento desmesurados, por lo que se descarta como posible solución. Se destaca en terreno cohesivo la gran semejanza en los resultados entre el modelo de diferencias finitas RSPILE y el PLAXIS 2D en condiciones axilsimétricas.
- En cuanto a los giros, el método normativo es el que presenta mayor giro en la cabeza del pilote; seguido del método de Broms. En cuanto a los modelos numéricos, el menor giro en cabeza corresponde al modelo de RSPILE en terreno granular y al modelo de PLAXIS 2D en condiciones axilsimétricas en terreno cohesivo. Los valores del modelo de PLAXIS 2D en condiciones de deformación plana vuelven a ser desmesurados, por lo que se descarta como posible solución.
- Con respecto a los momentos flectores, tanto en arcilla como en arena, el método normativo está del lado de la seguridad (siempre tomamos como el más realista el modelo RSPILE). Sin embargo, los modelos de PLAXIS 2D en condiciones axilsimétricas y de Broms arrojan valores del máximo momento flector menores al de RSPILE. Cabe destacar, que en arena, el método de Broms se ajusta bastante bien y con mucha semejanza al modelo de RSPILE. En arcilla, la trayectoria mostrada por el modelo de PLAXIS 2D se ajusta bastante bien a la presentada por el modelo RSPILE.
- En cuanto a los cortantes, todos los métodos arrojan valores del máximo cortante positivo menores a los proporcionados por el RSPILE; excepto el método normativo ROM-05 en terreno arenoso siguiendo el criterio del CTE. Sin embargo, se repiten algunas tendencias como con la distribución del momento: la envolvente del método de Broms es muy parecida a la de RSPILE en arena y a la de PLAXIS 2D en arcilla. La envolvente proporcionada por la normativa ROM-05 en el artículo 3.6.9.2.1 de la ROM-05 ($Q=M/M_0 \cdot H$) difiere del resto al no considerar posibles valores positivos del esfuerzo cortante. Por tanto, debido a que la envolvente del cortante según el método normativo que sigue el criterio del CTE o la ecuación (2.35) se asemeja más al resto de envolventes de los otros métodos, se recomienda una revisión de la ROM-05 para subsanar esta diferencia en la ley de cortantes de pilotes sometidos a cargas laterales.
- En lo que se refiere a los modelos:
 - o El método normativo es el más conservador en su conjunto. Es el método que mayores desplazamientos y máximos momentos flectores produce, pese a no estar del lado de la seguridad en términos del cortante en el caso de las arcillas. Sin embargo, no debemos olvidar que los valores del cortante se han basado en una mera aproximación fruto de la teoría de resistencia de materiales (la distribución del esfuerzo cortante es la derivada negativa de la distribución momento flector).
 - o El método normativo, utilizando la formulación para el cortante recogida en el artículo 3.6.9.2.1 de la ROM-05, no se adapta, en absoluto, a las envolventes de dicho esfuerzo según las leyes observadas en el resto de los métodos estudiados.
 - o En arcillas, el modelo PLAXIS 2D en condiciones axilsimétricas se ajusta bastante bien a los desplazamientos de RSPILE. Sin embargo, este comportamiento no se da en términos de esfuerzos, ni para un suelo arenoso ni para uno arcilloso. Cabe destacar la gran semejanza que comparte con el método analítico propuesto por Broms en el cálculo de los esfuerzos a lo largo del pilote en una arcilla.

- El método de Broms es el más antiguo de los estudiados; sin embargo, debemos resaltar la gran semejanza mostrada por los resultados en comparación con el modelo de RSPILE. Aunque el Estado del Arte y las técnicas de computación que manejaban Broms, Matlock y Reese eran muy diferentes a las actuales, dicho método no difiere demasiado del modelo de RSPILE (el más realista) a la hora de calcular los desplazamientos y esfuerzos en terreno granular.
- Los resultados del estudio llevado a cabo en el capítulo 6 indican que, tanto para arenas como para arcillas, el modelo de PLAXIS 2D utilizando el elemento *pilote embebido* (condiciones en deformación plana) no se ajusta en absoluto a la realidad a la hora de calcular los desplazamientos laterales y giros.

7.5 Conclusiones generales

En lo que respecta al análisis paramétrico realizado en los capítulos 4, 5 y 6, las conclusiones que podemos extraer en referencia a las condiciones establecidas en el apartado 1.2 (longitud del pilote, diámetro del pilote, consistencia/compacidad del terreno, tipo de material del pilote y presencia del NF), son:

- 1) El parámetro más influyente en el movimiento lateral de la cabeza del pilote es la compacidad/consistencia del terreno. Su influencia también es destacada en el cálculo del momento flector, pero no llega a superar ni al cambio de diámetro ni al tipo de material del pilote.
- 2) Variaciones en el diámetro del pilote tienen una gran influencia en el máximo momento flector soportado y en el desplazamiento lateral y giro de la cabeza del pilote.
- 3) Emplear un pilote de acero en lugar de un pilote de hormigón armado se traduce en un descenso de más de 1cm en el desplazamiento de la cabeza del pilote para una misma situación de carga, tanto para arcillas como para arenas. Igualmente, el giro en dicho punto ve reducido su valor, como mínimo, a la mitad (en algunos casos el descenso es de hasta seis veces). Por otro lado, el máximo momento flector soportado se ve incrementado de manera considerable en el pilote de acero; no así el máximo cortante positivo que es superior en un pilote de HA.
- 4) Aumentar la longitud, de manera general, no provoca cambios apreciables en los desplazamientos ni en los esfuerzos.
- 5) La presencia del nivel freático en terreno granular tiene influencia, aunque mínima, tanto en los desplazamientos como en el giro. Su mayor efecto se produce en el momento flector máximo soportado, donde puede haber diferencias de hasta 110 kNm si cambia la situación de la arena.
- 6) Se comprueba, tanto en arenas como en arcillas, que no es recomendable el uso de los resultados obtenidos con el modelo PLAXIS 2D en deformación utilizando elementos finitos tipo *pilote embebido*, dado que las leyes de desplazamientos y giros de este método se alejan demasiado de los representados por otros métodos analíticos, normativos y numéricos (RSPILE).
- 7) A la hora de calcular los desplazamientos y esfuerzos en terreno granular, se resalta que, aunque las técnicas de computación propuestas por Broms, Matlock y Reese y descritas en el Estado del Arte son muy diferentes a los actuales o numéricas, las leyes del método de Broms se ajustan razonablemente bien a las mostrados por el modelo de RSPILE, el cual hemos considerado más realista dado que sus trayectorias se ajustan excelentemente bien con las obtenidos mediante cálculo en elementos finitos 3D (Meyer y Reese, 1979).
- 8) Se aprecia una diferencia importante en la ley de cortantes cuando se comparan los modelos analíticos y numéricos con la norma ROM 05. Esta diferencia se justifica en el hecho de que el cortante es calculado multiplicando la carga lateral en cabeza (H) por un coeficiente corrector β que va de la unidad a cero. Si queremos que la ley de cortantes se ajuste a la de los modelos analíticos o numéricos (cortantes negativos y positivos), según el CTE, los cortantes se deben calcular derivando las leyes de momentos ($Q = -\frac{\Delta M}{\Delta z}$)

8 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Como líneas de investigación o desarrollos futuros se propone la realización de estudios complementarios al Trabajo de Fin de Grado para mejorar y aportar nuevos conocimientos al Estado del Arte de pilotes cargados lateralmente. Ejemplos de estas líneas de investigación serían:

- Introducción de resultados obtenidos a partir de ensayos a escala real con el fin de comparar las leyes de desplazamientos y esfuerzos con los modelos utilizados en este TFG.
- Considerar un grupo de pilotes, unidos por un encepado, que se vea afectado por cargas laterales.
- Tener en cuenta posibles condiciones de contorno en la cabeza tales como cabeza articulada o empotrada.
- Considerar secciones del pilote diferentes a la maciza circular: forma en H, tubular, cuadrada, etc.
- Tener en cuenta terrenos multicapa o heterogéneos.
- Considerar la influencia del flujo o movimiento del agua.
- Trabajar con modelos de comportamiento del terreno y del pilote más avanzados como los modelos Cam Clay Modificado, Soft Soil Creep y/o Hardening Soil. De esta manera, podremos tener en cuenta fenómenos como la consolidación, terreno blando o relleno, reptación, etc.
- Utilizar *softwares* basados en el Método de los Elementos Finitos que modelen mejor el comportamiento tridimensional del pilote (PLAXIS 3D).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Apuntes de la asignatura Obras Geotécnicas, de 4º curso de GIC en la Universidad de Sevilla.
- [2] Brinkgreve, R.B.J., 2018. «Plaxis Reference Manual 2018», *PLAXIS 2D Manual* [en línea]. Delft University of Technology. PLAXIS. Disponible en: <https://www.plaxis.com/support/manuals/plaxis-2d-manuals/>
- [3] Broms, B., 1964. «Lateral resistance of piles in cohesive soils», *Journal of the Soil Mechanic and Foundation Division*, Nueva York, ASCE, Vol.90, no.2, pp. 27-63.
- [4] Broms, B., 1964. «Lateral resistance of piles in cohesionless soils», *Journal of the Soil Mechanic and Foundation Division*, Nueva York, ASCE, Vol.90, no.3, pp. 123-158.
- [5] Dao, T. P. T., 2011. *Validation of PLAXIS Embedded Piles For Lateral Loading* [en línea]. Delft University of Technology, Tesis de Máster. Disponible en: [uuid:a713bc26-25b7-49d4-bef0-9103ea395474](https://www.researchgate.net/publication/31035474)
- [6] Davisson, M. T., 1970. «Lateral Load Capacity of Piles», en *Highway Research Record*, [en línea] pp. 104-112. Disponible en: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1970/333/333-010.pdf>.
- [7] Matlock, H. y Reese, L.C., 1956. «Non-dimensional solutions for laterally-loaded piles with soil modulus assumed proportional to depth », *Proceedings of the 8th Texas Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Austin, Texas, pp. 1-41.
- [8] McClelland, B. y Focht, J.A.J., 1956. «Soil Modulus of Laterally Loaded Piles», *Transactions*, Nueva York, ASCE, Vol.123, pp. 1049-1063.
- [9] Ministerio de Fomento. Comisión Permanente del Hormigón, 2008. *Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)*.
- [10] Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2009. *Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera (GCOC)*.
- [11] Ministerio de Fomento. Puertos del Estado, 2005. *Recomendaciones Para Obras Marítimas: Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias (ROM 0.5-05)*.
- [12] Ministerio de Vivienda, 2008. «CTE-SE-C-Seguridad estructural Cimientos», *Código Técnico de la Edificación (CTE) Boletín Oficial del Estado*.
- [13] Meyer, B. J. y Reese, L. C., 1979. *Analysis of Single Piles Under Lateral Loading* [en línea]. University of Texas. Center for Transportation Research. Disponible en: <https://library.ctr.utexas.edu/digitized/texasarchive/phase1/244-1-ctr.pdf>
- [14] París, F., 1996. «El Método de los Elementos Finitos», *Teoría de la Elasticidad*, Tercera Edición, Sevilla, Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales. Universidad de Sevilla, 2000. ISBN: 84-88783-32-9
- [15] Poulos, H.G, 1971. «Behavior of Laterally Loaded Piles I. Single Piles», *Journal of the Soil Mechanic and Foundation Division*, Nueva York, ASCE, Vol.97, no.5, pp. 711-731.
- [16] Quintero, A. B., Rodríguez, R. L. y Rivero, Y. S., 2016. *Modelación de pilotes cortos-rígidos sometidos a cargas laterales*. Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”.
- [17] Rocscience, 2018. «Laterally Loaded Piles», *RSPILE Theory Manual* [en línea]. Disponible en: https://www.rocscience.com/help/rspile/pdf_files/theory/RSPile_-_Laterally_Loaded_Pile_Theory.pdf
- [18] Teoría de Mindlin–Reissner. *Wikipedia: La Enciclopedia Libre*. 7 junio 2018 a las 10:58 [consulta 16 julio 2018, 17:23]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Teoría_de_Mindlin-Reissner.

- [19] Teoría de Mohr-Coulomb. *Wikipedia: La Enciclopedia Libre*. 16 diciembre 2017 a las 21:34 [consulta 30 julio 2018, 18:48]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Teoría_de_Mohr-Coulomb.
- [20] Terzaghi, K., 1955. «Evaluation of Coefficient of Subgrade Reaction», *Geotechnique, London*, Vol.5, no.4, pp. 297-326.
- [21] Vesic, A., 1961. «Beams on Elastic Subgrade and the Winkler's Hypothesis», en *5th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, París, Vol.1, pp. 845-850.
- [22] Winkler, E., 1867. *Die Lehre von Elastizität und Festigkeit (Sobre Elasticidad y Resistencia)*. Praga, 1867, pp. 182.